UNIVERSITÉ DE LYON

FACULTÉ DES SCIENCES

N° D'ORDRE 308

# THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

## FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE

## DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

**Marc SCHŒLLER**

ATTACHÉ DE RECHERCHES AU C. N. R. S.

**1re Thèse.** — RECHERCHES SUR L'ACQUISITION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES.

**2e Thèse.** — *Propositions données par la Faculté :* CONCENTRATION DES EAUX SOUTERRAINES PAR ÉVAPORATION ET PAR DISSOLUTION.

*soutenues le 7 juin 1963 devant la Commission d'examen*

MM. J. FLANDRIN ..... *Président.*

M. AUMÉRAS ..... } *Examinateurs.*

P. GEVIN ..... }

V. FROLOW ..... *Invité.*

BORDEAUX

IMPRIMERIE E. DROUILLARD

3, PLACE DE LA VICTOIRE, 3

1963

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552328_0009

UNIVERSITÉ DE LYON

N° D'ORDRE 308

FACULTÉ DES SCIENCES

# THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

## FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE

## DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

**Marc SCHŒLLER**

ATTACHÉ DE RECHERCHES AU C. N. R. S.

**1re Thèse.** — RECHERCHES SUR L'ACQUISITION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES.

**2e Thèse.** — *Propositions données par la Faculté :* CONCENTRATION DES EAUX SOUTERRAINES PAR ÉVAPORATION ET PAR DISSOLUTION.

*soutenues le 7 juin 1963 devant la Commission d'examen*

MM. J. FLANDRIN ..... *Président.*

M. AUMÉRAS ..... } *Examinateurs.*

P. GEVIN ..... }

V. FROLOW ..... *Invité.*

BORDEAUX

IMPRIMERIE E. DROUILLARD

3, PLACE DE LA VICTOIRE, 3

1963

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

UNIVERSITÉ DE LYON

# FACULTÉ DES SCIENCES

*Doyens honoraires :*

MM. Longchambon, Douin, Moussa, Henri Gauthier.

*Professeurs honoraires :*

MM. Locquin, de Larambergue, Doeuvre, Sollaud, Mentzer, Moussa, Jaffard, Douin, Henri Eyraud.

*Doyen :*

M. Braconnier.

*Assesseur :*

N...

*Professeurs :*

| | |
|---|---|
| MM. Longchambon | Minéralogie. |
| Dejardin | Physique générale. |
| Courty | Chimie - Physique. |
| Prettre | Chimie industrielle. |
| Kuhner | Botanique. |
| Malecot | Mécanique rationnelle et appliquée. |
| Paris | Chimie minérale. |
| Aumeras | Chimie. |
| Colonge | Chimie organique. |
| Flandrin | Géologie appliquée. |
| Janin | Physique expérimentale. |
| Bernard | Physique industrielle. |
| Dufay Jean | Astronomie. |
| Nigon | Zoologie expérimentale. |
| Gauthier Henri | Géologie générale. |
| Viret | Géologie générale. |
| Wautier | Zoologie. |
| Chopin | Chimie biologique. |
| Cueilleron | Chimie. |
| Braconnier | Calcul différentiel et intégral. |
| Eyraud Charles | Chimie - Physique appliquée. |
| Sarazin | Physique nucléaire. |
| Peres | Physiologie. |
| Mesnard | Electronique. |
| Grandmontagne | Physique. |
| Boidin | Microbiologie et Mycologie. |
| Boutillier | Minéralogie. |
| Lafoucrière | Physique nucléaire. |
| Dreux | Chimie organique. |
| Teichner | Chimie industrielle. |
| Pavans de Ceccatty | Zoologie. |
| Dufay Maurice | Physique de l'atmosphère. |
| Merlin | Chimie analytique. |
| Fraisse | Mathématiques. |

*Professeurs sans Chaire :*

| | | |
|---|---|---|
| MM. | GAUME | Physique. |
| | PHILBERT | Physique nucléaire. |
| | COHEN-ADAD | Chimie. |
| | DEPRAZ | Physique nucléaire. |
| | FÉRON | Mathématiques. |
| | LAFORGUE | Physique. |
| | DAVID Louis | Géologie générale. |
| | GAUTHIER Jean | Chimie. |
| | LEGAY | Zoologie expérimentale S. P. C. N. |
| | UZAN | Physique S. P. C. N. |
| | CHENEVOY | Géologie appliquée. |

*Maîtres de Conférences :*

| | | |
|---|---|---|
| M^lle | MAITROT | Physique. |
| MM. | CHANEL | Psychophysiologie. |
| | ASCH | Physique. |
| | GINET | Zoologie. |
| | MAURY | Mathématiques. |
| | MICHEL | Minéralogie. |
| M^me | ERICSON | Physique générale. |
| MM. | GEVIN | Géologie générale. |
| | PONASSE | Mathématiques. |
| | MARTEL | Mécanique. |
| | CHÉRY | Physique. |
| | LEFEBVRE | Mathématiques. |
| | D'INCAN | Physique. |
| | PERNET | Mathématiques. |
| M^lle | GAUTHERON | Chimie biologique. |
| MM. | BERGEON | Physique C. S. U. |
| | MATHIEU | Mécanique des fluides. |
| | LUBET | Physiologie. |
| | DUCET | Biologie végétale. |
| | ERBEIA | Physique. |
| | DESCOTES | Chimie organique. |
| | PICARD | Mathématiques. |
| | LEMOIGNE | Botanique. |

*Maître de Conférences Adjoint :*

M. PIERRON ..... Chimie.

*Secrétaire Principal honoraire :*

M. ROUX.

*Secrétaire Principal :*

M. BURNET.

# RECHERCHES SUR L'ACQUISITION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

## INTRODUCTION

Ce travail est une contribution à l'étude de l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines.

Nous sommes parti des idées suivantes : les eaux souterraines doivent acquérir la majeure partie de leur composition chimique dans le sol agricole, lorsqu'il y en a un. Le sol agricole étant le résidu de l'altération des assises géologiques, les éléments chimiques passeraient donc en solution à la surface même de la roche mère. Seules, en effet, les eaux du sol contiennent suffisamment d'acides (acide carbonique, acides organiques) pour attaquer les minéraux des roches. En profondeur, ils sont presque neutralisés et la simple mise en solution n'apporterait que des quantités très faibles d'éléments, les roches étant très peu solubles.

Nos études ont montré qu'il en est bien ainsi.

Puisque dans chaque type pédologique, les résidus de l'altération des roches sont différents, la composition chimique des solutions des sols doit varier, elle aussi. Nous l'avons constaté par l'étude des eaux des sols podzoliques sur « Sable des Landes » et des eaux des sols bruns lessivés sur le « Calcaire à Astéries » de la région bordelaise.

La composition chimique des eaux du sol agricole doit donc être la même que celle des nappes d'eau souterraine sous-jacentes; c'est ce que nous avons mis en évidence. La composition chimique des eaux des sols peut varier d'un point à un autre ou d'une saison à l'autre : l'eau de la nappe est à peu près identique à celle du sol, elle suit les mêmes variations. Nous l'avons observé aussi bien pour les régions des sols bruns lessivés que celles des sols podzoliques. Il y a sans doute quelques légères différences : concentrations parfois plus faibles ou plus fortes, teneurs en bicarbonates et en

nitrates plus élevées, rapport K/Na plus grand que dans les eaux de la nappe souterraine sous-jacente. Mais elles s'expliquent facilement et n'infirment pas le principe posé ci-dessus. Puisque le sol agricole possède des horizons bien distincts, les eaux de chacun de ces horizons, pensions-nous, devaient avoir leur composition propre.

Dès lors, on devait pouvoir, d'une manière précise, suivre l'évolution de la composition chimique de l'eau d'infiltration au fur et à mesure de sa descente; nous avons en effet constaté cette variation de la composition dans le sens vertical; elle est plus nette dans les sols bruns lessivés que dans les sols podzoliques. Toutefois, elle est beaucoup plus faible que nous ne le pensions. Ce résultat, en apparence décevant, a été fructueux : il nous a amené à envisager l'existence d'un cycle pédologique des sels; il passe par les végétaux, et tend à rendre homogène la composition des solutions des sols.

Il fallait naturellement tenir compte du rôle des saisons dans tous les phénomènes hydrochimiques; en Aquitaine, par exemple, il y a deux périodes bien tranchées : l'une d'infiltration, l'autre d'évapo-transpiration. La première est celle de la dilution, la seconde celle de la concentration : nous l'exposerons au cours de cette étude. Nous montrerons que les eaux d'infiltration qui gagnent les nappes, n'ont pas la même concentration suivant le moment de l'année. Les nappes reçoivent, par exemple, des bouffées de sels à la fin de l'automne.

Les études faites d'abord sur les extractions des solutions des sols, puis sur les eaux de drainage des cases lysimétriques, nous ont montré le rôle de première importance joué par la composition chimique de l'eau de pluie sur le bilan des éléments chimiques des solutions des sols. Dans ce bilan intervient nécessairement la végétation qui puise les éléments en profondeur dans le sol et les amène à la surface. Cette action homogénéise la composition des eaux des sols dans les divers horizons; elle a été bien mise en évidence.

Pour suivre ce bilan chimique, nous avons tout particulièrement utilisé le chlore. Il s'est montré un auxiliaire fidèle et précieux; il nous a permis, en outre, de calculer le bilan hydrologique des cases lysimétriques.

Après avoir constaté le parti que l'on pouvait tirer du chlore comme indicateur géochimique des bilans, nous avons dirigé notre étude sur les nappes souterraines.

Connaissant la concentration en chlore de l'eau de pluie et celle des eaux souterraines, il est possible dans certains cas de

calculer le coefficient d'alimentation des nappes. Nous l'avons fait pour la nappe des « Sables des Landes ». Les résultats que nous avons obtenus sont satisfaisants puisque nous obtenons les mêmes valeurs qu'avec la méthode de Thornthwaite; le bilan hydrologique du bassin de l'Eyre nous en donne une autre confirmation.

Nos études n'ont porté que sur des sols podzoliques sur sable purement siliceux et sur des sols bruns lessivés sur calcaire grossier, sous le climat de Bordeaux. Elles se rapportent donc à des cas bien limités. Il est bien évident que nous ne pouvons généraliser nos conclusions à tous les sols, à tous les terrains, sous tous les climats. Les sols rouges méditerranéens, les sols à croûte calcaire, les tchernozems, les solonetz, les solantchaks, sur telle ou telle assise géologique, calcaire, siliceuse, marneuse, granitique, etc., pourraient donner des résultats différents.

De même, le calcul du bilan d'une nappe à l'aide du chlore s'applique à des nappes bien déterminées, celles des sables essentiellement siliceux des Landes, où le ruissellement est négligeable.

Autrement dit, ce travail n'est que le commencement d'une étude à poursuivre.

Dans un premier chapitre, nous exposons *les facteurs qui interviennent dans la composition chimique de l'eau d'infiltration :* la composition chimique de l'eau de pluie, les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui ont lieu dans le sol.

Le second chapitre concerne l'*Etude de la composition chimique des solutions des différents horizons du sol.* L'étude a porté à la fois sur les solutions de sols bruns lessivés et de sols podzoliques, et sur les eaux de drainage de cases lysimétriques placées sous les horizons A, B, et C d'un sol podzolique. Ce chapitre se termine par un bilan des éléments chimiques et du chlore en particulier, dans les cases lysimétriques.

Le troisième chapitre est relatif au *Bilan du chlore et de l'eau dans les nappes des « Sables des Landes ».*

---

# CHAPITRE PREMIER

## FACTEURS INTERVENANT DANS LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU D'INFILTRATION

### I. — LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU DE PLUIE

La composition chimique de l'eau de pluie joue un rôle très important dans notre étude. Il est nécessaire que nous en donnions un aperçu.

Le rôle de la composition chimique de l'eau de pluie dans les eaux superficielles et dans les eaux souterraines avait déjà été indiqué par Vernadsky (1934) et souligné en particulier par Maximovitch (1953) et Eriksson (1958), pour ne signaler que les principaux auteurs. Mais tous en sont restés à des vues générales; ils se réfèrent surtout aux eaux superficielles. Dans notre travail, nous apportons des vues nouvelles qui concernent plus spécialement les eaux souterraines. Nous verrons, par des exemples précis, quelle est la contribution de l'apport des éléments chimiques qui proviennent de la pluie dans la composition chimique des eaux souterraines.

#### A. — Origine des sels contenus dans l'eau de pluie

Dans les tableaux suivants, nous donnons quelques analyses de la composition chimique des eaux de pluie. Toutes les eaux de pluie renferment, de quelques dixièmes à quelques dizaines de milligrammes de Ca, Mg, Na, K, Cl, $SO_4$, $NO_3$, $HCO_3$; elles contiennent encore d'autres éléments tels que P, I, Br, As, B et C. L'apport par les pluies d'éléments, même en concentration très faible, est un fait important dans la géochimie de l'écorce terrestre. Par exemple, selon les données

de A. A. Saoukov (*in* Bourkser et Fedorova, 1955), la pluie apporte sur l'ensemble du globe terrestre 100 000 tonnes annuelles de mercure, ce qui représente plus de vingt fois son extraction minière. La quantité moyenne d'iode apportée par les précipitations atmosphériques dans le sol des régions continentales atteint environ 10 g par hectare et par an (Bourkser et Fedorova, 1955).

L'origine de ces sels est très diverse :

— Il y a un premier apport par les sels océaniques et les volcans : les sels océaniques peuvent être transportés en abondance dans la basse atmosphère jusqu'à une distance relativement faible de la côte (de 100 à 300 km) ; mais ils sont aussi transportés beaucoup plus loin par les hauts courants atmosphériques, jusqu'à plus de 4 000 km de la mer, toutefois à des concentrations beaucoup plus faibles.

Les éléments apportés par les manifestations volcaniques peuvent être très abondants dans la pluie non loin des volcans. Au voisinage du Vésuve et du Paricutin, on a déterminé les teneurs suivantes de Cl dans la pluie (Eriksson, 1952) :

| | *p*H | Cl (mg/l) |
|---|---|---|
| *Vésuve :* | | |
| 5 mars 1934 | 2,96 | 247 |
| 17 mars 1934 | 3,16 | 193 |
| 10 mai 1934 | 2,39 | 202 |
| 18 mai 1934 | 2,82 | 105 |
| 30 juin 1934 | 3,09 | 88 |
| *Paricutin :* | | |
| En 1947, à 12 km au Nord du pied du volcan | | 440 |

Ces substances sont ensuite transportées au loin dans la haute atmosphère où elles sont très diluées.

Maximovitch (1953) estime que cette première minéralisation des gouttes d'eau des hautes couches de l'atmosphère (eau des nuages), due aux sels marins et aux produits volcaniques, peut monter jusqu'à 7 mg/l.

— La deuxième minéralisation, c'est-à-dire le deuxième apport, est dû aux sels continentaux élevés de la surface de la terre vers la troposphère. Maximovitch estime que cette minéralisation va de 23 à 100 mg/l en U. R. S. S. Les poussières

du sol sont élevées par des courants ascendants d'air, de la surface de la croûte terrestre vers la troposphère. Ces poussières proviennent donc du sol pédologique; la composition de ce dernier est étroitement liée aux zones géographiques. Il en résulte que la composition chimique des précipitations atmosphériques, ainsi que celles des eaux des sols, des eaux souterraines, des eaux de rivières, des eaux des lacs, sera caractérisée par une large zonalité. MAXIMOVITCH indique qu'en U. R. S. S., $HCO_3$ et $CO_3$ prédominent dans les zones boisées; $HCO_3$ et $SO_4$ dans les zones des steppes; $HCO_3$, $SO_4$, Cl, Na dans les steppes sèches et les zones semi-désertiques.

— La troisième minéralisation est due aux pollutions humaines, par le chauffage et l'industrie. C'est une pollution localisée. On peut considérer l'exemple de Knoxville (p. 12) : dans l'agglomération, $SO_4$ est de 14,5 mg/l; à 1/2 mille de la ville, il n'est plus que de 5,6. L'eau de pluie de Talence, du 30 mai 1962, contenait 12,33 mg de $SO_4$ contre 5 à 3 ordinairement. Ce supplément de $SO_4$ provenait de Lacq, situé à 158 km; il avait été apporté par le vent du Sud.

Le bilan général des éléments de l'eau de pluie sur le globe terrestre n'a été calculé que pour Cl et S. D'après ERIKSSON (1959), les quantités en kg de Cl et de S mises en mouvement par hectare et par an seraient les suivantes :

| | Cl | | S | |
|---|---|---|---|---|
| Production volcanique | 0,2 | | 0,02 | |
| Altération dans le sol et les roches | 0,04 | | 0,44 | |
| Production humaine : | | | | |
| Combustion du charbon | 0,01 | | 0,6 | |
| Industrie | 2,3 | 2,6 | 1,0 | 2,1 |
| Transport par les rivières | 15,5 | | 11,1 | |
| Sels cycliques (d'origine marine) : | | | | |
| 15,5 - 2,6 | | 12,9 | | |
| 11,1 - 2,1 | | | | 9,0 |

### B. — Concentrations en sels, en fonction de la distance de la mer

Comme la mer est une source importante des sels de l'eau de pluie, il est évident que la concentration en sels doit diminuer depuis la côte vers l'intérieur. C'est ce que l'on peut voir d'après les analyses d'eau de pluie en Allemagne. Non seulement la concentration diminue, en particulier pour Mg, Na et Cl qui sont les principaux éléments de l'eau de mer, mais également les rapports des éléments entre eux diminuent aussi. Ainsi, le rapport r Mg/r Ca d'abord voisin de celui de l'eau de mer, près de la côte, décroît vers l'intérieur où il est semblable à celui des eaux souterraines.

Cette diminution de la minéralisation a été surtout observée pour le chlore, comme le montre le tableau suivant :

*Aquitaine* (1) :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Côte ..... | 10 - 20 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| A 50 km de la côte ... | 4 - 5 | — | — | — |
| A 150 km — ... | 2,5 | — | — | — |

*Languedoc* :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sète ..... | 32 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| A 35 km de la côte .... | 1,6 | — | — | — |
| A 70 km — .... | 0,6 | — | — | — |

*Brest* (2) :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A 0,03 km de la côte.. | 77,88 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| 1,93 km — .. | 19,49 | — | — | — |
| 25 km — .. | 15,41 | — | — | — |
| 60 km — .. | 13,48 | — | — | — |

*Hollande* (3) :

| | par vent S. W. | par vent Sud |
|---|---|---|
| A 0,44 km de la côte ..... | 47 mg/l | 5 mg/l |
| 3 km — ..... | 16 — | 1 — |
| 6 km — ..... | 16 — | 1 — |

*Allemagne* (4) :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A 0,20 km de la côte.. | 37,6 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| 50 km — .. | 4,9 | — | — | — |
| 450 km — .. | 1,9 | — | — | — |
| 800 km — .. | 0,9 | — | — | — |
| 960 km — .. | 0,6 | — | — | — |
| 1 250 km — .. | 0,3 | — | — | — |

*Suède* [5] :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A 0 km de la côte | .... | 22 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| 2 km — | .... | 5 | — | — | — |
| 12 km — | .... | 1,8 | — | — | — |
| 135 km — | .... | 0,7 | — | — | — |

*Australie S. E.* [6] :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A 1 km de la côte | .... | 23,5 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| 20 km — | .... | 8,8 | — | — | — |
| 65 km — | .... | 3,9 | — | — | — |
| 120 km — | .... | 0,94 | — | — | — |
| 160 km — | .... | 1,07 | — (*) | — | — |
| 200 km — | .... | 2,4 | — (*) | — | — |

*Japon* [7] :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A 0 - 10 km de la côte | .. | 2,7 | mg/l | moyenne | annuelle. |
| 10 - 30 km — | .. | 0,9 | — | — | — |
| > 30 km — | .. | 0,4 | — | — | — |

La décroissance de la teneur en Cl varie d'une contrée à l'autre, car elle est sous la dépendance des facteurs climatologiques. Il y a cependant une certaine régularité dans cette décroissance qui est exponentielle. Aussi a-t-on pu l'exprimer sous forme d'équation.

D'après Conway (1942), on aurait aux U. S. A., entre la côte de l'Etat du Maine et les Grands Lacs :

$$Cl = 5{,}7\, e^{-0{,}0367\, x} + 0{,}55\, e^{-0{,}00242\, x}$$

D'après Leeflang (1938), *in* Eriksson (1952), en Hollande on aurait :

$$Cl = 11{,}7\, e^{-0{,}525\, x} + 3{,}0\, e^{-0{,}0230\, x} + 3{,}0$$

Dans ces équations, Cl est la teneur en milligrammes du chlore de l'eau de pluie à la distance x de la côte, x étant exprimé en kilomètres.

---

(1) Marc Schœller (1960); (2) *In* Behne (1953); (3) Heymann, *in* V. Fellenberg (1926); (4) Riehm et Quellmalz (1959); (5) Harlin, *in* O. Arrhenius (1954); (6) Hutton (1958); (7) Hanya (1951).

(*) La concentration plus grande du chlore à grande distance de la côte montre que du chlore peut provenir des continents, en particulier dans les régions arides.

Pour le Bassin d'Aquitaine, nous avons établi la formule :

$$Cl = 16\,e^{-0{,}0462\,x} + 7\,e^{-0{,}00231\,x}$$

Elle est voisine des deux équations précédentes. On a toujours une fonction exponentielle, mais les facteurs et les exposants varient d'une région à une autre, en particulier en raison des facteurs climatiques.

### C. — Variation de la composition chimique dans le temps en un même point

Nous voudrions surtout insister sur le point suivant : la variation de la composition chimique, en un même point, en fonction du temps. En effet, lorsque nous utilisons la composition chimique de la pluie pour calculer par exemple les apports annuels de substances ou bien pour calculer le coefficient d'alimentation des nappes, il ne faut pas se servir d'une seule analyse, mais prendre une moyenne, après avoir fait la somme des apports de chaque pluie, chacune pouvant avoir sa composition chimique et sa concentration en sels. Notre attention avait été en effet attirée par les variations considérables de concentration en chlore de l'eau de pluie, d'une chute à l'autre. Nous avions dosé le Cl de chaque pluie et pris la moyenne de la concentration : elle est de 5 mg/l. Toutefois, elle peut osciller entre 0,25 et 39 mg/l.

Si la composition chimique à Talence est variable (p. 11), ce n'est pas une exception comme le montrent les analyses de l'eau de pluie de la région des Lacs en Angleterre (Cumberland), celles de Tachkent (Ouzbekistan), de Mildura en Australie. Elle dépend de la direction et de l'intensité du vent, de la durée de la pluie. La teneur en éléments est plus forte au début de la pluie qu'à la fin. Miller a pu établir une relation entre la teneur en Cl (en mg) et la pluviométrie (P) à Rothamsted (*in* Eriksson, 1952) :

$$Cl = 2 + 3/P \text{ en hiver,}$$
$$Cl = 0{,}5 + 3/P \text{ en été,}$$
$$Cl = 1{,}25 + 3/P \text{ pour l'année.}$$

P est exprimé en inches.

## D. — Composition des eaux de pluie
(exprimée en milligrammes/litre)

| | Ca | Mg | Na | K | $NH_4$ | Cl | $SO_4$ | $NO_3$ | $HCO_3$ | rK/rNa | rMg/rCa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *France :* | | | | | | | | | | | |
| Talence (Gironde) (1) : | | | | | | | | | | | |
| 10 octobre 1961 ..... | 10,0 | 0,5 | 3,0 | 1,0 | » | 7,0 | 5,0 | 8,0 | 24,0 | » | » |
| 30 mai 1962 ..... | 7,2 | 0,48 | 1,0 | 2,8 | » | 1,77 | 12,33 | 0,16 | 15,25 | » | » |
| 17 juillet 1962 ..... | 4,1 | 0,5 | 3,5 | 1,0 | » | 7,81 | 3,0 | 0 | 9,15 | » | » |
| Observatoire de Paris (2)..... | 4,4 | 1,3 | » | » | » | 2,8 | » | 13,8 | » | » | » |
| — — ..... | 3,8 | 1,4 | » | » | 3,3 | 1,9 | » | 21,4 | » | » | » |
| *Allemagne* (3) : | | | | | | | | | | | |
| Westerland *(a)* ..... | 1,43 | 1,79 | 18,45 | 0,78 | 0,39 | 37,60 | » | 1,64 | » | 0,03 | 2,09 |
| Schleswig *(b)* ..... | 1,18 | 0,40 | 2,36 | 0,37 | 0,79 | 4,52 | » | 1,59 | » | 0,09 | 0,57 |
| Braunschweig *(c)* ..... | 2,74 | 0,52 | 0,74 | 0,33 | 0,80 | 2,00 | » | 2,12 | » | 0,27 | 0,32 |
| Augustenberg *(d)* ..... | 1,80 | 0,37 | 0,36 | 0,26 | 0,70 | 0,88 | » | 1,73 | » | 0,43 | 0,34 |
| Hohenspeizenberg *(e)* ..... | 1,56 | 0,27 | 0,19 | 0,76 | 0,29 | 0,65 | » | 0,80 | » | 2,36 | 0,29 |
| Retz *(f)* ..... | 1,91 | 0,22 | 0,16 | 0,38 | 0,38 | 0,28 | » | 1,28 | » | 1,40 | 0,19 |
| *Angleterre* (4) : | | | | | | | | | | | |
| Région des Lacs (4) : | | | | | | | | | | | |
| Id. 14 mai - 30 juin ..... | 0,5 | 0,1 | 1,3 | » | » | 2,0 | 4,3 | » | 0,4 | » | » |
| 1er juillet - 31 août ..... | 0,2 | 0,1 | 1,6 | » | » | 2,7 | 3,5 | » | 0,4 | » | » |
| 14 septembre - 23 octobre.... | 0,2 | 0,3 | 2,4 | » | » | 4,2 | 2,4 | » | 0,4 | » | » |

COMPOSITION DES EAUX DE PLUIE *(suite)*
(exprimée en milligrammes/litre)

| | Ca | Mg | Na | K | $NH_4$ | Cl | $SO_4$ | $NO_3$ | $HCO_3$ | rK/rNa | rMg/rCa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Russie :* | | | | | | | | | | | |
| Moyenne de 190 eaux (5) | 4,82 | 1,74 | 5,12 | » | » | 5,46 | 9,17 | » | 18,20 | » | » |
| U. R. S. S. (40 points) (6) : | | | | | | | | | | | |
| Maximum | 31,06 | 8,30 | 30,82 | » | » | 255,6 | 90,28 | » | 90,28 | » | » |
| Minimum | 0,60 | 0,30 | 0,62 | » | » | 1,08 | 3,05 | » | 3,05 | » | » |
| *Asie :* | | | | | | | | | | | |
| Tachkent (7) : | | | Na + K | | | | | | | | |
| 2 février 1960 | 16,03 | » | 4,6 | | » | 3,5 | 14,81 | » | 30,5 | » | » |
| 23 février 1960 | 8,00 | 0,24 | 22,08 | | » | 3,5 | 27,98 | » | 42,70 | » | » |
| 2 mars 1960 | 4,00 | » | 6,44 | | » | 3,5 | 9,87 | » | 12,2 | » | » |
| 7 mars 1960 | 2,00 | » | 18,63 | | » | 7,0 | 24,69 | » | 12,2 | » | » |
| 4 mai 1960 | » | » | 16,33 | | » | 6,81 | 10,70 | » | 18,3 | » | » |
| Steppe de la Faim : | | | | | | | | | | | |
| 12 mars 1960 | 8,16 | 2,10 | 17,02 | | » | 13,62 | 16,42 | » | 36,6 | » | » |
| 4 mars 1960 | 24,04 | 9,72 | 6,67 | | » | 7,0 | 42,79 | » | 73,2 | » | » |
| 4 mars 1960 | 16,03 | 4,86 | 12,19 | | » | 7,0 | 30,45 | » | 54,9 | » | » |
| *U. S. A. :* | | | | | | | | | | | |
| Knoxville : | | | | | | | | | | | |
| Tennessee (8), à 1/2 mille de la ville | 0,9 | 0,4 | 1,5 | 2,6 | » | 3,3 | 5,6 | » | » | » | » |
| Centre de la ville | 2,8 | 0,7 | 3,6 | 5,5 | » | 6,5 | 14,5 | » | » | » | » |

COMPOSITION DES EAUX DE PLUIE *(suite)*
(exprimée en milligrammes/litre)

| | Ca | Mg | Na | K | $NH_4$ | Cl | $SO_4$ | $NO_3$ | $HCO_3$ | rK/rNa | rMg/rCa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Australie :* | | | | | | | | | | | |
| South Perth (9) | 1,2 | 0,8 | 8,7 | 0,5 | » | 17,1 | 3,3 | » | 1,83 | » | » |
| Mildura (Victoria) (10) | | | | | | | | | | | |
| Septembre 1954 | 32,0 | 5,3 | 17,0 | 6,2 | » | 19,6 | 38,4 | » | 91,5 | » | » |
| Novembre 1954 | 2,7 | 0,5 | 1,4 | 0,4 | » | 1,1 | 0,5 | » | 12,8 | » | » |
| Décembre 1954 | 2,8 | 0,2 | 0,7 | < 0,4 | » | 0,35 | nd | » | 11,6 | » | » |
| Janvier 1955 | 14,4 | 1,2 | 3,5 | 0,8 | » | 3,5 | 5,8 | » | 44,5 | » | » |
| Octobre 1955 | 5,4 | 0,8 | 2,5 | < 0,4 | » | 3,5 | 0,95 | » | 19,5 | » | » |
| *Afrique :* | | | | | | | | | | | |
| Tunis | 10,0 | 2,0 | 4,0 | » | » | 14,0 | 0 | » | 26,0 | » | » |
| — | 6,0 | 2,0 | 2,0 | » | » | 7,0 | 0 | » | 20,0 | » | » |
| *En général* (11) (d'après VERNADSKY) : | | | | | | | | | | | |
| Maximum | 54,0 | 1,3 | 160 | » | » | 220,0 | 87,0 | » | 25,0 | » | » |
| Minimum | 0,6 | 0,13 | 0,008 | » | » | 0,02 | 0,15 | » | 1,0 | » | » |

(1) Au Centre d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de Bordeaux; (2) LEFORT (1859); (3) RIEHM et QUELLMALZ (1959) : *a)* 0,200 km de la mer; *b)* à 50 km; *c)* à 450 km; *d)* à 800 km; *e)* à 900 km; *f)* à 1 250 km de la mer; (4) GORHAM (1955); (5) DUROV, *in* CHILINGAR (1956), et DUROV et FEDOROVA (1955); (6) A. S. KHASSANOV (1961); (7) BOURKSER et FEDOROVA (1955); (8) *In* RANKAMA et SAHAMA (1950); (9) ANDERSON (1940); (10) HUTTON (1958); (11) VERNADSKY (1934), p. 303. On a transformé S et C donnés par VERNADSKY en $SO_4$ et $HCO_3$.

## II. — LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DANS LES SOLS

Comme nous serons amené à attribuer l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines aux phénomènes biochimiques qui ont lieu dans le sol, il est nécessaire de les préciser en donnant un court aperçu de la formation des sols en ce qui concerne notre étude.

### A. — Formation des sols

Tout d'abord, rappelons qu'un sol est la partie superficielle des roches, altérée au contact de l'atmosphère et des êtres vivants. C'est un complexe vivant naturel comprenant la matière minérale, qui vient de la roche-mère, et les matières organiques provenant des êtres vivants, le tout en évolution sous l'action des agents extérieurs, ainsi que de la faune et de la flore internes (G. Plaisance et A. Cailleux, 1958). Il est le plus souvent formé de plusieurs horizons superposés : A, B, C, D, indiqués de haut en bas.

A est l'horizon éluvial présentant des phénomènes de lessivage. Il peut être subdivisé en $A_0$ de couleur noire et comprenant plus de 80 % de matière organique en décomposition; $A_1$ de couleur gris foncé, où la matière organique est mélangée intimement avec la matière minérale; $A_2$, horizon le plus appauvri, ne contenant que très peu de matière organique et présentant souvent une couleur cendreuse; $A_3$, horizon de transition, plus coloré que $A_2$ (il n'existe pas toujours).

B est l'horizon illuvial ou d'accumulation. $B_1$ est un horizon de transition avec $A_2$; $B_2$ présente le maximum d'accumulation; $B_3$ fait la transition avec C.

C est la roche en place qui peut être désagrégée.

D, la roche-mère intacte.

Quand on examine les phénomènes biochimiques qui ont lieu dans le sol, on oublie trop souvent que les sols se forment par l'attaque de la roche-mère et qu'ils en sont un résidu. La formation des sols est conditionnée par les attaques de la roche-mère et des éléments du sol, par les précipitations qui peuvent y avoir lieu, par les mouvements des sels.

*Les attaques* de la roche-mère et des éléments du sol se font par le gaz carbonique produit dans le sol par la vie organique

et par la décomposition de la matière organique. Une très faible teneur du $CO_2$ est apportée de l'atmosphère par la pluie. Evidemment, l'intensité de l'attaque dépend de la quantité de matière organique, de la vitesse de leur décomposition, de l'arrivée possible d'oxygène dans le sol, de l'humidité du sol et de la température. La vitesse et la nature de l'attaque dépendent de la nature pétrographique de la roche-mère et des constituants des résidus qui se trouvent dans le sol.

*Les précipitations.* — S'il y a des mises en solution, il y a aussi des précipitations. Elles dépendent de la concentration des solutions des sols; ces concentrations peuvent se faire par évaporation physique du sol ou par absorption de l'eau par la végétation, mais elles dépendent aussi des combinaisons qui peuvent avoir lieu entre les éléments dissous et les éléments solides du sol. Le taux d'arrivée d'oxygène joue un rôle primordial, en particulier pour le fer qui peut passer de l'état ferreux à l'état ferrique, facilement précipitable. Ces précipitations, naturellement, sont fonction du *p*H et de la température.

*Les mouvements des sels en solutions* jouent un rôle prépondérant dans la formation pédologique; ils déterminent la formation d'un podzol, d'un sol brun ou de tel autre type.

Dans un sol, au moment de l'infiltration des pluies, il peut y avoir des descentes de sels; ces sels proviennent, pour une part, de ceux qui sont apportés par la pluie; il s'y ajoute, dès la surface, les sels dissous, issus des éléments minéralisés des restes végétaux et animaux contenus dans les divers horizons A. Ces sels descendants comprennent aussi ce qui provient de l'attaque des éléments résiduels qui se trouvent dans les horizons A et B; ce n'est que lorsque l'eau descendante atteint la partie supérieure de l'horizon C que l'attaque de la roche-mère peut se produire. Nous insistons sur ce point très important pour comprendre comment se forme la composition chimique des eaux souterraines.

Par contre, à certains moment de l'année, il peut y avoir des remontées de sels. Il faut bien préciser le mécanisme de ces remontées. Il peut y avoir remontée par ascension capillaire, à l'intérieur du sol. On a beaucoup insisté sur cette remontée capillaire qui se produit à la suite du desséchement de la surface du sol; mais on n'insiste pas assez sur une autre remontée dont nous montrerons toute l'importance en l'évaluant quantitativement. Il s'agit de la remontée des éléments

absorbés par les végétaux dans les divers horizons du sol et amenés dans les parties aériennes. Il y a appauvrissement des solutions des sols, et des sols eux-mêmes, en ces éléments absorbés, mais enrichissement de la surface quand meurent les végétaux. La remontée a donc été canalisée par les racines; elle ne s'est pas faite par les interstices du sol.

Les végétaux transportent les éléments chimiques des horizons inférieurs vers l'horizon supérieur.

*Les accumulations dans les sols.* — Le sol est donc le résidu de l'attaque de la roche-mère; il y aura des concentrations de certains éléments plus grandes que dans la roche-mère; nous appellerons accumulations ces augmentations de concentration. Nous distinguerons d'abord des accumulations résiduelles.

*Les accumulations résiduelles* sont les éléments qui n'ont pas été dissous ou attaqués, ou qui ne l'ont été que partiellement par les eaux descendantes : le quartz, dans tous les cas; l'argile, très souvent; l'hydroxyde ferrique, lorsque les conditions physicochimiques le permettent; divers silicates; le calcaire, très rarement, lorsque le lessivage est très faible. Ces accumulations résiduelles se trouvent dans tous les horizons, de A en C. Les éléments les plus résistants sont évidemment proportionnellement plus abondants en haut qu'en bas.

*Les accumulations par migration descendante* se font sous l'action physico-chimique des eaux d'infiltration. Ce sont des accumulations de matières organiques à base d'humus, de substances minérales qui proviennent de la minéralisation de l'humus, de substances qui proviennent des minéraux résistants dans les horizons supérieurs et dont l'altération n'était pas achevée, des substances ayant subi une ascension préalable à la suite d'évapo-transpiration.

*Les accumulations par migration ascendante,* à la suite des phénomènes d'évapo-transpiration sont abondantes. C'est le cas d'accumulation de calcaire, de gypse et peut-être parfois d'hydroxyde ferrique, d'hydroxyde de manganèse.

### B. — Les facteurs généraux de la formation des sols

Il résulte de tout cela que les facteurs qui déterminent, le plus généralement, les conditions de formation des sols et par conséquent leurs différents types, se réduisent à deux dans les conditions naturelles : la nature de la roche-mère et le climat, la végétation dépendant elle-même du climat; la

végétation ne doit être considérée comme un troisième facteur que si l'homme intervient.

On sait que, quand il s'agit d'une durée très longue, le facteur pétrographique s'efface devant le facteur climatologique dans la détermination des types de sols. Mais il reste important — il est nécessaire d'insister sur ce point — pour déterminer la composition chimique des eaux souterraines : les solutions dans ces eaux représentent la somme algébrique de la quantité d'éléments dissous à partir de la roche-mère, d'une part, et, d'autre part, la quantité d'éléments résiduels en phases liquides et solides qui se forment durant une même période dans le sol. Si l'équilibre de formation pédologique est atteint, si les mouvements sont devenus permanents, la composition chimique doit refléter la nature pétrographique de la roche-mère.

Les facteurs climatologiques comprennent :

— *La hauteur annuelle de pluie* P, qui permet les transports descendants des éléments chimiques dans le sol;

— *L'évapo-transpiration annuelle* E [1], qui assure le transport des éléments ascendants;

— *L'infiltration annuelle* I = P — E, qui permet le transport et la mise hors circuit des éléments du sol vers les nappes d'eau souterraine. C'est un facteur de lessivage et la grandeur de I en détermine l'intensité;

— *La température,* qui règle la vitesse des réactions chimiques et avec l'humidité, la production et la décomposition de la matière organique, animale et végétale, et par conséquent l'intensité et la vitesse des attaques des phases solides, minérales et organiques.

*La nature pédologique des sols, la composition chimique des eaux souterraines en fonction du climat.* — Les facteurs

(1) Il y a lieu de distinguer l'évapo-transpiration de l'évaporation. L'*évaporation* est la quantité d'eau évaporée physiquement par le sol en un temps donné, tandis que l'*évapo-transpiration* est la quantité totale d'eau évaporée, c'est-à-dire la quantité d'eau évaporée physiquement par le sol, plus la quantité d'eau absorbée par la végétation pour la constitution de ses tissus, et sa transpiration. On distingue l'*évapo-transpiration réelle,* c'est-à-dire la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée, de l'évapo-transpiration potentielle, c'est-à-dire la quantité d'eau qui, compte tenu du climat et particulièrement de la température, pourrait être évaporée et transpirée si l'approvisionnement en eau était suffisant pour répondre à tous les besoins d'une végétation couvrant complètement le sol.

climatologiques qui interviennent ici sont : la chute de pluie annuelle P, l'évaporation totale, c'est-à-dire l'évapo-transpiration annuelle E, qui déterminent l'infiltration annuelle I a, I a = P — E, alimentant la nappe. Lorsque P — E > 0, il y a lessivage du sol, entraînement continuel des éléments dissous vers les eaux souterraines. Plus I a est grand, c'est-à-dire plus la quantité d'eau de pluie qui s'infiltre jusqu'à la nappe est grande, plus il y a dilution des sels dans l'eau souterraine.

Lorsque P — E < 0, deux cas sont à envisager :

1° La frange capillaire de la nappe atteint la surface du sol : il y a évaporation et accumulation incessante des sels dans le sol, par mouvements ascendants;

2° La frange capillaire est en profondeur : on doit avoir nécessairement P — Er = 0. Er étant l'évapo-transpiration réelle avec E — Er > 0.

Dans les deux cas, il ne peut pas y avoir d'évaporation plus grande que la quantité d'eau de pluie. A considérer les phénomènes rapidement, il ne devrait pas y avoir d'eau d'infiltration; par là-même, il ne devrait pas y avoir de formation de sols, résidus d'une roche-mère; le sol devrait avoir exactement la composition chimique de la roche-mère, puisqu'il n'y aurait aucun départ. Mais si l'on regarde plus attentivement, on voit que ce qui compte, ce n'est pas la moyenne annuelle P — E, mais la différence momentanée p — dr entre la pluie p et le déficit dr d'eau de rétention du sol au moment où cette pluie p est tombée. Il peut se faire que, parfois, lorsque p est élevé, la différence soit positive; l'infiltration i vers la nappe a lieu et sera naturellement très chargée en sels dissous.

Lorsque P = E, c'est le cas limite qui a une stabilité relative. Il y a localement des phénomènes de lessivage et de précipitations.

Les sols qui se forment dans ces conditions sont les suivants en U. R. S. S. (1).

---

(1) D'après les données de Gorchkov et Iakouchova (1957), p. 107,

$$Ic = \text{indice climatique } I - \frac{P}{\theta + 10}.$$

P = pluviosité en millimètres.

$\theta$ = température annuelle en centigrades.

1° *Sols de toundras et de toundras boisées :*

$\theta$ [1] annuelle : — 0,2 à — 4,4.

$\theta$ janvier : — 40°9.

Trois mois sans gelées.

P = 250 - 300 mm.

P — Er > 0 Ic > 40.

2° *Sols podzoliques forestiers et podzols herbeux :*

$\theta$ annuelle : 7° à 0°8.

$\theta$ janvier : — 2,7 à — 16°2.

P = 600 - 500 mm.

E = 600 - 700 mm.

P — Er > 0 I > 40.

3° *Sols bruns forestiers :*

$\theta$ annuelle : 10° à 15°.

$\theta$ janvier : — 2° à + 4°.

P = 600 - 800 mm.

E = 650 - 750 mm.

P — Er > 0 Ic = 30 à 40.

4° *Tchernozemes des steppes herbeuses - Climat sec - Eté chaud :*

P = 500 - 300 mm, pluies d'été prédominantes (pluies d'hiver : 13 % - 17 %).

E = 700 - 900 mm Ic = 10 à 25.

P — Er faible.

5° *Sols châtains des steppes sèches :*

P = 300 - 250 mm.

E > 1 000 mm.

P — Er très faible.

6° *Sols grisâtres des steppes désertiques et des déserts :*

$\theta$ annuelle : 13 à 17°.

$\theta$ max. été > 40°.

P = 100 - 150 mm.

E → 1 500 mm.

P — Er extrêmement faible. Ic voisin de 10.

Pas de couverture végétale.

7° *Sols rougeâtres ou jaunâtres des régions subtropicales humides :*

$\theta$ annuelle : 13°5 à 14°5; pas d'hiver.

$\theta$ janvier : 5°5 à 7°.

P : 2 500 à 3 000 mm et même 4 000 mm.

---

(1) $\theta$ = température moyenne, annuelle ou mensuelle.

Classification des sols d'après Demolon (1935, 1952).

| Types de sols | Climat | P mm | P/T | P/S (1) | P/T + 10 |
|---|---|---|---|---|---|
| Sols nettement podzoliques, zone Atlantique. | humide | > 700 | > 125 | > 1 000 | 55 à 110 |
| Sols légèrement podzoliques, zone Atlantique. | humide | 600 à 700 | 60 à 100 | 375 à 1 000 | 35 à 55 |
| Sols bruns, Est France.. | humide-T 10° | 600 | 60 à 80 | 275 à 400 | 28 à 33 |
| Tchernozemes et sols châtains ..... | semi-humide | 500 | 40 à 70 | 100 à 275 | 20 à 24 |
| Terres rouges ..... | méditerranéen | 400 | 20 à 40 | 100 à 170 | » |
| Sols brun clair de steppe aride ..... | semi-aride | 200 à 300 | » | » | 10 à 20 |
| Steppes désertiques et sols salins ..... | aride | 0 à 200 | 0 à 20 | 0 à 100 | » |

(1) S = déficit de saturation de l'air.

### C. — Possibilités de migrations aqueuses

L'un des phénomènes majeurs dans la formation des sols est celui des migrations des éléments entraînés en solution par les mouvements ascendants et descendants; tous les éléments n'ont pas les mêmes possibilités de migrations aqueuses.

Autrement dit, la possibilité de migration d'un élément chimique du sol est caractérisée par la fraction des atomes d'un élément donné passant à l'état mobile pendant un temps donné. La possibilité de migration s'exprime donc par la vitesse de passage d'une quantité donnée de substance à l'état mobile.

### D. — Coefficient de migration par l'eau

Il existe un rapport entre la concentration d'un élément donné dans l'eau naturelle et sa concentration dans la roche drainée par les eaux. Ce rapport est appelé *coefficient de migration Kx* par l'eau.

Les migrations se feront plus facilement pour certains éléments que pour d'autres. Ainsi le chlore et les sulfates sont

des migrants très mobiles; le calcium, le magnésium, le sodium le sont moins; le fer est peu mobile.

Les éléments ne migrent donc ni de la même manière, ni en quantité égale, mais on peut admettre un mouvement presque permanent.

Un classement peut être envisagé. Les éléments les plus mobiles des migrations aqueuses sont aussi les plus importants dans les solutions des sols comme dans les eaux souterraines. Ils ont un clarke [1] élevé et forment des composés ou des gaz solubles. Il faut tenir compte, dans la classification, de l'acidité ou de l'alcalinité du milieu, ainsi que du potentiel d'oxydo-réduction qui est lié à la présence de matière organique.

### E. — Coefficient d'absorption biologique

Nous montrerons ultérieurement le rôle important joué par la végétation dans les mouvements des sels en solution. Les végétaux créent un mouvement ascendant de substances absorbées dans les divers horizons du sol, puis accumulées à la surface dans les parties aériennes. Il est nécessaire de connaître la quantité d'éléments susceptible d'être absorbée; cette quantité est fonction de la concentration de ces éléments dans la roche. Il y a un rapport constant entre la concentration en éléments contenus dans les végétaux et la concentration en éléments contenus dans la roche : *ce rapport sera appelé le coefficient d'absorption biologique.*

Tout ce que nous venons de dire au sujet des possibilités de migration aqueuse, du coefficient de migration par l'eau, du coefficient d'absorption biologique, a été pris à l'ouvrage de Perel'man (1961) : Géochimie du « milieu ».

Nous donnons en annexe (p. 179 et suivantes) un extrait plus développé de cet ouvrage de Perel'man, car toutes ces notions nous paraissent très importantes.

### F. — Cycle pédologique

Il y a lieu de mettre maintenant en évidence la notion du cycle pédologique.

Dans un cycle pédologique interviennent deux sortes d'activités qui jouent en sens contraire : les activités physico-chimiques et les activités biologiques, surtout végétales. Nous

(1) Le clarke, du nom du géochimiste américain, est un terme introduit par Vernadsky. C'est le pourcentage moyen d'un élément donné dans la croûte terrestre.

avons vu que les éléments minéraux en solution qui proviennent de l'attaque de la roche-mère peuvent, en certains cas, remonter par ascension capillaire dans le sol et même s'y déposer en partie, d'une manière ou provisoire ou définitive. Mais ces solutions peuvent, parfois, traverser la surface de séparation des horizons B et C, s'infiltrer et gagner les nappes d'eau souterraine. S'il n'y avait que l'eau et les agents d'attaque comme conducteurs, dans le cas où la frange capillaire de la nappe n'atteint pas le sol, le phénomène de lessivage serait prédominant et il y aurait un appauvrissement accentué des éléments solubles du bas vers le haut. Mais la végétation joue un rôle; les plantes absorbent les éléments minéraux du sol depuis l'horizon B et même C, puis les remontent dans les parties aériennes. Ces éléments minéraux sont ensuite libérés par la décomposition des végétaux et redescendent dans le sol où ils sont à nouveau repris par les racines. Il y a ainsi un cycle biologique qui diminue le lessivage des terrains.

Il y a en définitive : — une descente par infiltration des éléments mis en solution par les attaques biochimiques et des éléments qui proviennent de la décomposition des organismes à la surface du sol et dans l'horizon A;

— Une remontée par capillarité dans le sol, à certains moments, des éléments en solution. Cette remontée ne dépasse pas la surface, mais les éléments remontés peuvent être partiellement repris par le mouvement descendant. La proportion de ce qui est fixé et de ce qui est mis en solution est déterminée par la différence P — E;

— Une remontée par la végétation des éléments en solution dans le sol. Cette remontée ne se fait pas par les pores du sol, mais par les racines; elle va jusqu'au-dessus de la surface du sol dans les parties aériennes des plantes.

Ce cycle n'est pas complètement fermé : l'eau descendante apporte avec elle les éléments chimiques contenus dans l'eau de pluie; d'autre part, une partie de l'eau du circuit s'en écarte pour gagner par infiltration les nappes d'eau souterraine.

Il y a des substances qui circulent plus facilement par les plantes que par l'eau et qui peuvent donc s'accumuler en surface ($SiO_2$). D'autres substances, au contraire, ne sont que faiblement remontées par les plantes (Fe, Al), d'où un appauvrissement des horizons supérieurs. D'autres éléments sont facilement transportés par les plantes : K, $NH_4$, Ca, Mg, Na. Ils enrichissent l'horizon A, appauvrissent B où se trouvent

les racines. Cela ne signifie pas forcément que B soit plus pauvre que A en ces éléments; mais ce brassage diminue la différence entre A et B.

Le cycle biologique a donc une importance considérable. Pour le caractériser, Perel'man (1961, p. 62) utilise deux coefficients :

1° La capacité du cycle biologique, c'est-à-dire la quantité maxima des éléments chimiques qui se trouvent dans la composition chimique des éléments vivants;

2° La vitesse du cycle biologique, c'est-à-dire la quantité maxima de substance vivante qui se forme et se répartit par unité de temps.

Perel'man établit ainsi quatre types de cycles biologiques :

— Un type forestier, caractérisé par une grande capacité, une vitesse de cycle grande ou moyenne;

— Un type de steppe, de prairie et de désert, caractérisé par une capacité moyenne ou faible et une grande vitesse;

— Un type de toundra, caractérisé par une capacité moyenne ou faible et une vitesse très petite (cycle ralenti);

— Un type de désert primitif, caractérisé par une capacité faible et une grande vitesse.

## G. — Rôle des saisons

Les saisons jouent un rôle primordial dans les mises en solution et les précipitations. Notre étude montrera dans quelle mesure la composition chimique des eaux imbibant le sol peut varier.

La période d'évapo-transpiration est la période des eaux fortement concentrées restant sur place; par conséquent, elles sont susceptibles de précipiter. C'est également une période d'aération du sol, l'eau ne remplit pas complètement les pores. Le fer ferreux passe alors à l'état de fer ferrique et peut précipiter.

Au contraire, la période pluvieuse est la période des eaux très diluées; elles sont mobiles, traversant toute l'épaisseur du sol, c'est la période de lessivage, les substances sont entraînées en profondeur. C'est aussi la période pendant laquelle les pores peuvent être dans certains cas complètement — et pendant longtemps — remplis d'eau; pour peu qu'il y ait suffisamment de matière organique, il se crée un milieu réducteur qui permet au fer de passer à l'état ferreux, donc à l'état mobile.

# CHAPITRE II

## ÉTUDE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES SOLUTIONS DES DIFFÉRENTS HORIZONS DU SOL

### I. — INTRODUCTION

Nous nous sommes proposé de rechercher comment les eaux souterraines acquièrent leur composition chimique.

Les profils des différents types pédologiques montrent nettement que la surface de séparation de la zone B et de la zone C, et dans une certaine mesure le niveau C au-dessus de D, correspondent à une zone d'attaque par les eaux d'infiltration. Les horizons A et B ne sont pas autre chose que les résidus de l'attaque de la roche-mère au niveau de l'horizon C. L'horizon B lui-même est un résidu, malgré les précipitations chimiques qui s'y produisent; celles-ci peuvent se faire *per descensum* ou *per ascensum*. Si l'on examine la roche-mère sous l'horizon C, jusqu'à la surface de la nappe, on ne constate que des phénomènes négligeables de corrosion par dissolution ou par actions chimiques, sauf dans des cas exceptionnels comme dans les massifs calcaires. C'est donc dans le sol agricole que les eaux souterraines ont dû acquérir presque tous les éléments dissous qu'elles contiennent.

Mais comment évolue la composition chimique de l'eau d'infiltration dans les différents horizons du sol ? A priori, les eaux de chacun des horizons doivent se différencier les unes par rapport aux autres. Par leur analyse, on doit pouvoir saisir le processus de l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines.

L'eau de pluie ne contient qu'une petite quantité d'éléments chimiques : 0,2 à 4 mg/l de $NH_4$; très faibles quantités de $NO_2$; 1 à 3 mg/l de $SO_4$; de 0,1 à 9 mg/l de Na + K; 0,8 à 10 mg/l de Ca; 0,4 à 1,6 mg/l de Mg; de 0,1 à 2 mg/l de Cl, bien que sa teneur puisse monter jusqu'à 80 mg/l. On pourrait donc croire que ces éléments ne jouent presque aucun rôle. Mais nous verrons ultérieurement — et cela grâce aux phénomènes d'évapo-transpiration — que ce rôle est au contraire extrêmement important.

Les phénomènes de dissolution et les attaques chimiques dans les sols jouent certainement un rôle considérable. Ils sont nombreux :

Il y a d'abord les dissolutions pures, l'hydratation, l'hydrolyse; l'acide carbonique qui provient de la dissolution du $CO_2$ de l'atmosphère du sol joue un rôle important; il y a encore l'action des acides nitreux et nitriques et celle des acides organiques; il y a des oxydations et des réductions.

Le climat influe sur ces différents phénomènes : les mises en solution dépendent évidemment de la teneur en substances directement solubles, mais cette teneur est elle-même fonction des phénomènes de lessivage, i. e. de la hauteur des pluies annuelles et de la perméabilité du terrain; elle est aussi, en sens inverse, fonction du potentiel d'évaporation. D'où l'importance du climat pour la teneur en substances solubles.

L'hydratation et l'hydrolyse agissent sur les matières non solubles en provoquant la destruction de mailles cristallines. Mais le rôle le plus important est celui des acides : tout particulièrement celui du $CO_2$; l'eau de pluie n'en contient que de petites quantités (0,8 - 2,5 mg/l). Presque tout le $CO_2$ qui agit dans les phénomènes d'altération provient du sol; il a pour origine la matière organique vivante et morte, et les racines végétales, les animaux qui vivent dans le sol, les bactéries qui décomposent les matières organiques mortes, tout cela respire en dégageant une grande quantité de $CO_2$. Les oxydations peuvent aussi donner du $CO_2$ : par exemple, l'oxydation des sulfures donne $H_2SO_4$ qui attaque le calcaire en dégageant $CO_2$; les phénomènes d'ammonification produisent du $CO_2$; les acides nitriques et nitreux en attaquant les carbonates, enrichissent encore l'eau en $CO_2$.

Cependant, les minéraux ne subissent pas la seule attaque de $CO_2$. Il y a celle de ces acides nitriques et nitreux qui se produisent au cours des fermentations de la matière organique. Ce sont des acides forts, donc très actifs. D'autre part,

les végétaux et les produits de leur décomposition donnent des acides organiques.

Les facteurs climatiques (température et humidité) influent également sur ces échanges.

Ces agents d'attaque sont localisés dans le sol agricole, ils ne se retrouvent pas plus bas.

Il n'est pas inutile de remarquer qu'en définitive toute l'énergie, cause de ces attaques, est, comme pour tous les phénomènes de la dynamique externe, l'énergie solaire : la température, hauteurs de pluie, la matière organique. Celle-ci, synthétisée par l'assimilation chlorophyllienne, restitue, par degrés successifs et par combustion, l'énergie solaire.

## II. — LES MÉTHODES EMPLOYÉES

### A. — Extraction des solutions

Nous avons d'abord extrait les solutions des divers horizons des sols en prenant des échantillons à des époques données, dans des sols podzoliques et dans des sols bruns lessivés. L'extraction avait été faite par dilution ou par déplacement. Mais ces méthodes présentent des inconvénients : par déplacement, les quantités de liquide sont trop faibles; par dilution, l'échantillon n'est pas vraiment représentatif, car les dilutions entraînent des modifications d'équilibre, en particulier pour les carbonates. De plus, ces méthodes ne donnent que la composition chimique à un moment donné et ne permettent pas d'en suivre l'évolution.

Aussi, avons-nous poursuivi nos recherches en construisant des cases lysimétriques pour chacun des horizons du sol; elles permettent de recueillir les eaux d'infiltration au fur et à mesure de leur descente dans le sol.

Pour obtenir les eaux par dilution ou par déplacement, il nous a fallu suivre les processus suivants : les échantillons de terre ont été pris dans des sols pédologiquement déterminés, généralement dans des carrières à entaille fraîche, dont les coupes montrent nettement les différents horizons A, B, C et D. Ces prélèvements ont été faits dans chaque horizon, à plus de 60 cm de distance de la paroi de la carrière, de manière à avoir un sol non modifié; ils ont été ensuite placés immédiatement dans un bocal hermétiquement fermé, afin d'éviter l'évaporation et tout échange de gaz avec l'extérieur.

Pour extraire leur eau d'imbibition, nous avons eu recours à plusieurs méthodes :

### 1° *Méthode par déplacement*

Nous avons utilisé des liquides non miscibles (huile, essence, essence-huile). Les résultats ont été décevants. La tension superficielle de l'eau d'imbibition étant supérieure à celle de tous les liquides, nous ne pouvions recueillir de ce fait que des quantités tout à fait insuffisantes.

Nous avons alors utilisé des liquides miscibles comme l'alcool, mais il faut ensuite évaporer l'alcool pour récupérer l'eau, et cela provoque des changements dans la composition chimique, en particulier pour le $CO_2$.

Nous avons essayé aussi la méthode de Schloesing : elle utilise une solution concentrée de chlorure de sodium qui percole à travers une colonne de terre bien tassée. L'eau d'imbibition passe la première mais, là encore, en trop faible quantité pour être utilisée en vue d'analyses chimiques. A ce moment, le laboratoire n'avait pas la possibilité d'avoir l'équipement pour l'utilisation de la méthode Schloesing.

### 2° *Méthode par dilution*

Nous avons alors utilisé la méthode par dilution. Nous avons donc placé un poids déterminé de l'échantillon dans un volume connu d'eau distillée pendant un temps assez long, de manière que les éléments chimiques aient le temps de passer intégralement dans l'eau de dilution. Cette méthode permet d'avoir une plus grande quantité d'eau, et de procéder simultanément sur des échantillons différents de nature ou de provenance; on peut ainsi faire des études en série. Il y a encore deux inconvénients dont il faut tenir compte : les sels contenus dans l'eau d'imbibition sont dilués par l'apport d'eau distillée et la dissolution des roches est activée. C'était cependant la seule méthode possible.

Pour avoir suffisamment d'eau, il nous faut rétablir par calcul — et ce n'est que d'une manière approximative — la composition chimique de l'eau d'imbibition : nous nous servons des données précises concernant le degré d'humidité, les densités réelles et apparentes et la porosité de l'échantillon. Elles ont été calculées suivant les techniques ordinaires : les densités réelles ont été déterminées au pycnomètre, les densités apparentes, par mesure du volume et du poids de l'échantillon.

La porosité libre m a été évaluée par la méthode des volumes : V, volume total de l'échantillon; V', volume des particules solides de l'échantillon;

$$m = \frac{V - V'}{V}.$$

Lorsque l'échantillon était compact, il a été entouré de paraffine, et V a été déterminé par immersion. Lorsque l'échantillon était meuble — c'est le cas des sables —, V a été déterminé par tassement dans une éprouvette graduée. V' a été obtenue en mesurant le volume d'eau déplacée par l'échantillon ameubli versé dans une éprouvette garnie d'eau.

### B. — Les études chimiques

Les eaux d'imbibition des sols ont une très faible concentration en élément chimiques, et nous ne disposions que d'un faible volume d'eau (de l'ordre de 400 $cm^3$). Nous avions donc intérêt à trouver les méthodes les plus précises et les plus sensibles. Après en avoir essayé plusieurs, nous avons retenu :

*La colorimétrie :* pour le dosage du manganèse avec une solution de périodate de potassium; pour celui du magnésium avec le jaune thiazol; pour la silice, nous avons employé le molybdate d'ammonium; pour les nitrates, un mélange acide sulfurique - brucine.

*La photométrie à flamme :* pour le sodium, le potassium et le calcium.

*La volumétrie :* pour le $CO_2$ libre, avec une solution titrante d'acide chlorhydrique N/44 (un volume connu de soude titrée est versé dans la solution) avec comme indicateur la phénolphtaléine; on dose ainsi l'excès de soude; pour la somme des carbonates et bicarbonates, nous avons utilisé l'acide sulfurique N/10 et le méthylorange comme indicateur; pour les sulfates, une solution titrée de chlorure de baryum N/120 et le rhodizonate comme indicateur.

*La méthode de Mohr :* pour le dosage du chlore, l'eau a été préalablement débarrassée des substances gênantes : les matières organiques, les sulfures et les sulfites par addition de permanganate de potassium jusqu'à coloration rose persistante qui a été ensuite éliminée à l'aide d'une goutte d'eau

oxygénée; le fer par addition d'oxyde de zinc (une cuillerée) suivie d'agitation puis de filtration. La couleur a été effacée en ajoutant 3 cm³ de suspension d'hydroxyde d'aluminium. Enfin, le *p*H de l'eau a été ajusté à 7 au moyen soit d'acide sulfurique dilué, soit de soude diluée. Mais lorsqu'il s'agissait d'eau à faible concentration inférieure à 25 mg/l, nous avons suivi la méthode de Winkler la plus apte lorsque l'on n'a à sa disposition qu'une quantité limitée d'eau. Nous avons employé comme indicateur 1 cm³ de chromate de potassium à 10 p. 100 pour une prise d'eau de 100 cm³, et comme réactif une solution de $NO_3Ag$ N/35,46. Le virage a été terminé lors de l'apparition d'une teinte rose persistante, comparée à une solution témoin. Mais un tel dosage donne des valeurs trop élevées. Nous avons alors utilisé la correction de Winkler qui est la suivante lorsque l'on utilise la solution de $NO_3Ag$ N/35,46.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de $NO_3Ag$ N/35,46 employés. | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| Correction (en cm³). | — 0,13 | — 0,13 | — 0,14 | — 0,15 | — 0,15 | — 0,15 | — 0,16 | — 0,16 |
| Nombre de $NO_3Ag$ N/35,46 employés. | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 10,0 | 15,0 | 20,0 |
| Correction (en cm³). | — 0,16 | — 0,17 | — 0,18 | — 0,18 | — 0,19 | — 0,20 | — 0,21 | — 0,22 |

On peut donc doser le chlore jusqu'à une concentration descendant à 0,7 mg/l.

Lorsque l'eau a une concentration supérieure à 7 mg/l, nous nous sommes également servi de la méthode par potentiométrie avec électrode d'argent et électrode de verre, en utilisant le Titromatic Quéré et une solution de $AgNO_3$ N/100 préparée extemporanément.

Les résultats des analyses de ces solutions doivent être étudiés en fonction du volume mesuré de l'humidité du sol; de sa porosité.

Cette étude ne peut se faire qu'à l'aide de calculs qui rétablissent les conditions naturelles du sol. On calcule donc :

— Ce que serait sa concentration si, par réduction du volume de la dilution, on l'avait ramenée au volume de l'humi-

dité du sol; de cette façon, on obtient, avec la meilleure approximation possible, la composition chimique de l'eau de rétention; le volume correspond sensiblement à celui de l'eau de rétention;

— Ce que serait la concentration — toujours par réduction du volume de la dilution — si on l'avait ramenée au volume total des pores. Cette concentration ainsi obtenue doit correspondre à celle de l'eau de gravité qui descend jusqu'à la nappe i.e, approximativement à celle de l'eau d'infiltration qui vient de la surface du sol et qui dilue les eaux d'imbibition du sol.

Les phénomènes chimiques qui se produisent dans le sol sont complexes : il peut y avoir ou dilution, ou plus souvent, concentration; d'autre part, les concentrations des éléments ne se font pas en même temps, elles varient avec le degré de saturation de chacun d'eux. Certains éléments évoluent en gardant les mêmes rapports entre eux, d'autres ne changent pas. De nombreux facteurs interviennent et font que des eaux de même origine ont parfois des pourcentages différents des éléments.

La représentation sur graphiques semi-logarithmiques des analyses chimiques des différentes eaux sera utilisée pour faciliter les comparaisons entre les eaux de même origine et les eaux d'origine différente, tout en conservant les concentrations des divers éléments, i.e, sans avoir besoin de les réduire en pourcentage comme on en avait l'habitude auparavant. On peut ainsi essayer d'expliquer des phénomènes chimiques qui se produisent dans les eaux d'imbibition et dans les nappes souterraines et voir quelle est l'évolution des éléments chimiques des eaux d'infiltration au cours de leur descente jusqu'à la nappe phréatique sous-jacente (H. Schœller, 1935 et 1955).

Les concentrations des éléments chimiques sont portées sur un graphique semi-logarithmique. Ces éléments chimiques sont disposés à intervalles égaux sur l'axe des abscisses, successivement de gauche à droite, les radicaux r Ca, r Mg, r (K + Na) r Cl, r $SO_4$, r $HCO_3$, et sur l'axe des ordonnées, gradué suivant une échelle logarithmique, le nombre de milliéquivalents de chacun des radicaux. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'avantage de cette représentation est que, par suite de l'échelle logarithmique des ordonnées, toute droite qui réunit deux éléments d'une même eau et qui est parallèle à une autre droite réunissant les mêmes éléments d'une autre

eau, indique un même rapport des éléments. L'inclinaison des traits nous permet de connaître les rapports des éléments chimiques et surtout les rapports caractéristiques tels que $r\,SO_4/r\,Cl$ ; $r\,Mg/r\,Ca$ ; $r\,K/r\,Na$ et également l'indice d'échange de bases $\frac{r\,Cl - r\,(Na + K)}{r\,Cl}$ ou $\frac{r\,Cl - r\,(Na + K)}{r\,SO_4 + r\,HCO_3 + r\,NO_3}$.

## III. — LES SOLS BRUNS LESSIVÉS

Comme nous l'avons dit plus haut, nous avons étudié le chimisme des eaux d'imbibition de sols qui sont pédologiquement différents : les sols bruns lessivés et les sols podzoliques.

Ces sols ont été pris dans la région bordelaise.

Nous allons étudier successivement, dans ce chapitre, l'évolution chimique des eaux d'imbibition des sols bruns, puis celle des eaux d'imbibition des sols podzoliques. Pour celle des sols podzoliques, nous pourrons la comparer à celle des eaux de drainage des cases lysimétriques placées sur le terrain expérimental du laboratoire d'hydrogéologie-géochimie de Talence. En même temps, nous avons étudié le chimisme de l'eau de la nappe phréatique sous-jacente.

### A. — Description des sols

Dans la région bordelaise, les sols bruns lessivés reposent sur du calcaire à Astéries du Stampien. D'une façon générale, l'horizon $A_1$ est normalement riche en matière végétale, $A_2$ présente un léger lessivage; l'horizon B est argileux et l'horizon C est le calcaire à Astéries, devenu granuleux et meuble par altération, il repose sur l'horizon D dont le calcaire est compact.

Cette coupe pédologique se voit nettement dans des carrières, et c'est là que nous avons pris tous nos échantillons.

Nous avons étudié, à des époques différentes et en plusieurs points, les eaux d'imbibition des sols bruns de Baron et de Pompignac.

#### 1° *Sol de la carrière de Baron (Gironde)* (fig. 1)

Situation : coord. Lambert 391,0 - 284,6.

Ce sol est bien formé. Il est argileux avec, à la base, des éléments du calcaire à Astéries sous-jacent. Les densités

apparentes sont de 1,23 en $A_1$, 1,65 en $A_2$, 2,12 en B et 1,12 en C, le calcaire à Astéries y est très poreux. Les porosités varient de 0,181 à 0,500. La coupe est la suivante :

$A_1$ : argile brune, noirâtre : 0,70 m - 1 m;

$A_2$ : argile brune, jaunâtre : 1 m - 1,50 m;

$B_1$ : argile brune avec éléments rougeâtres : 1,50 m - 1,60 m;

C : calcaire jaune, pulvérulent, altéré : 1,60 m - 2 m;

D : calcaire franc.

Les échantillons de sol pour analyse des solutions ont été pris aux profondeurs suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| En $A_1$ à 0,70 m | en novembre 1954; | 0,80 m | en mai 1956; |
| $A_2$ à 1 m | — | 1 m | — |
| $B_1$ à 1,50 m | — | 1,50 m | — |
| C à 1,60 m | — | 1,65 m | — |

La nappe d'eau est à 8 m de profondeur sous le sol.

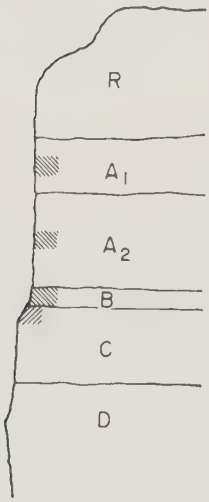



Fig. 1.

Sol de la carrière de Baron (Gironde).

R : remblai, 0,70 m; $A_1$ : argile brune noirâtre, 0,30 m; $A_2$ : argile brune jaunâtre, 0,50 m; $B_1$ : argile brune avec éléments rougeâtres, 0,10 m; C : calcaire altéré, 0,40 m; D : calcaire à Astéries, franc.

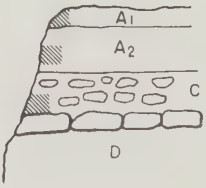



Fig. 2.

Sol de la carrière de Pompignac (Gde).

$A_1$ : terre argilo-calcaire noirâtre, 0,10 m; $A_2$ : terre argilo-calcaire jaune, 0,25 m; C : terre à petits blocs de calcaire, 0,20 m; D : calcaire à Astéries.

2° *Sol de la carrière de Pompignac (Gironde)* (fig. 2)

Situation : coord. LAMBERT 381,5 - 287,4.

Ce sol est squelettique, argileux avec des blocs de calcaires à Astéries. Il passe à la rendzine [1]. La coupe est la suivante :

$A_1$ : terre argilo-calcaire, noirâtre; épaisseur : 0,10 m;
$A_2$ : — — jaune; épaisseur : 0,25 m;
C : — — jaune, avec de petits blocs de calcaire; épaisseur : 0,20 m;
D : calcaire à Astéries.

A cet endroit, il n'y avait pas de végétation.

Les échantillons de sols pour analyse des solutions ont été pris aux profondeurs suivantes :

En $A_1$ à 0,10 m;
$A_2$ à 0,20 m;
C à 0,50 m.

La nappe d'eau est à 9 m sous le sol.

Les prélèvements ont été faits à Baron, en novembre 1954 et en mai 1956, et à Pompignac, en mai 1956.

## B. — ANALYSE DES EAUX DES SOLS

Dans les tableaux I, II et III [2], nous donnons les résultats des analyses des eaux des différents horizons des sols et de l'eau de la nappe phréatique sous-jacente (Baron, novembre 1954, mai 1956; Pompignac, mai 1956).

1° Les analyses des eaux de dilution; elles sont exprimées en milliéquivalents par litre (tableau I);

2° La composition de l'eau de dilution concentrée de manière que son volume soit égal à celui de l'humidité du sol (tableau II);

3° La composition de l'eau de dilution concentrée de manière que son volume soit égal à celui des pores (tabl. III).

## C. — EAUX DES SOLS EN DEUX POINTS DIFFÉRENTS A BARON ET A POMPIGNAC A LA MÊME DATE (fig. 4 et fig. 5)

A l'aide des tableaux précédents, nous comparons la composition chimique des eaux des sols différents de Baron et de Pompignac, prélevés au même mois (mai) de l'année 1956.

(1) La rendzine est un sol rocheux à fragments et cailloux de calcaire, sur roche-mère calcaire. Epaisseur faible : 5 à 30 cm. Pas d'horizon B.
(2) Ces tableaux se trouvent en annexe, à la fin de l'ouvrage.

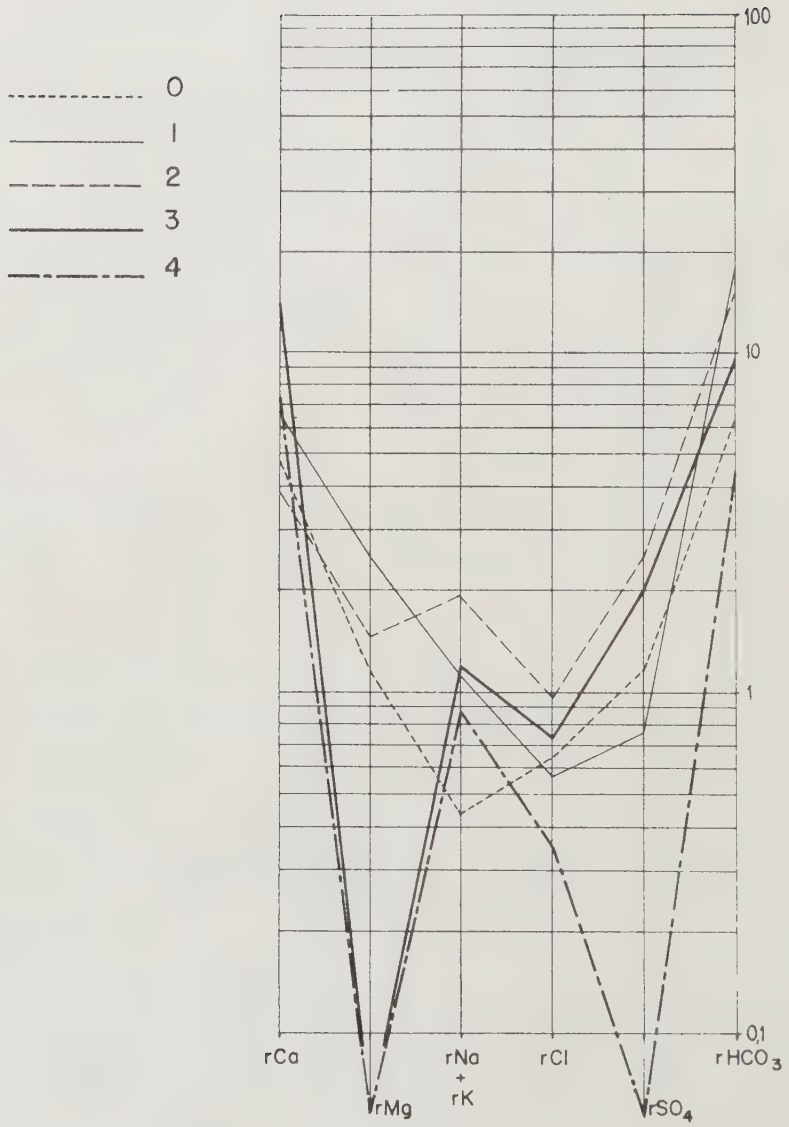



Fig. 3.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol de Baron (novembre 1954), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : eau de la nappe sous-jacente; 1 : eau de $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de $B_1$; 4 : eau de C.

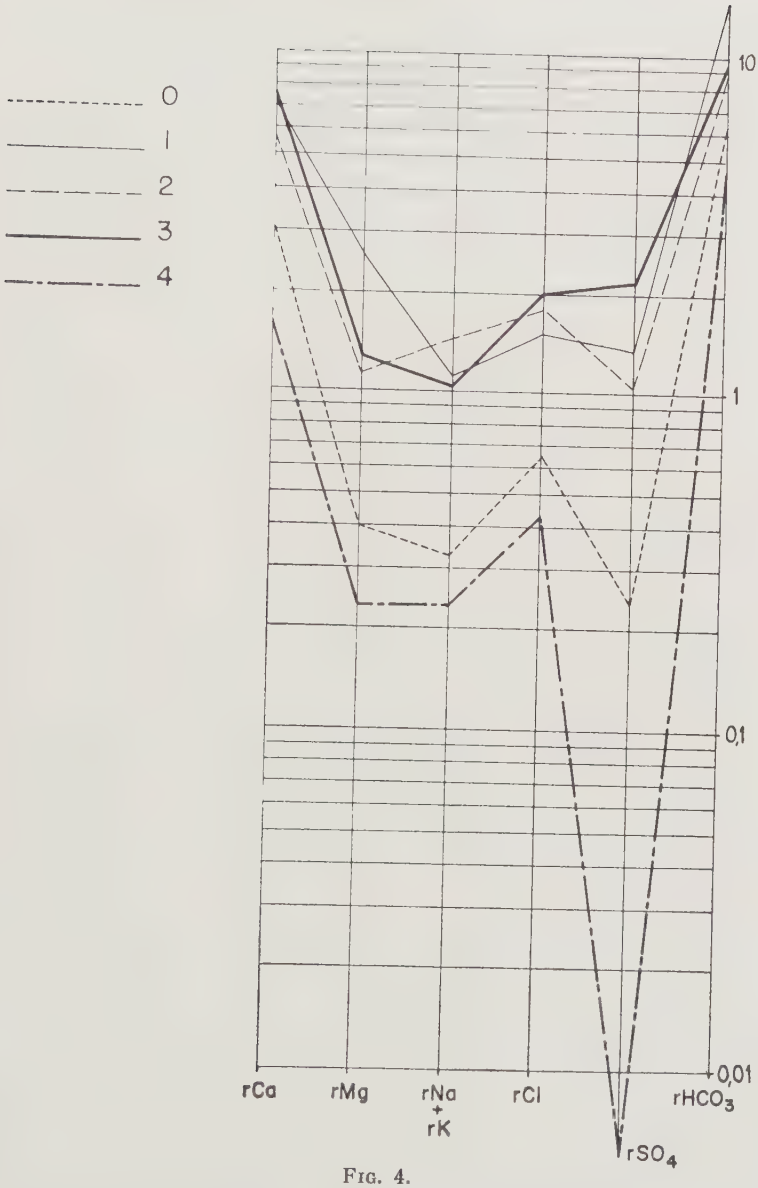



Fig. 4.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol de Baron (mai 1956), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : eau de la nappe sous-jacente; 1 : eau de $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de $B_1$; 4 : eau de C.

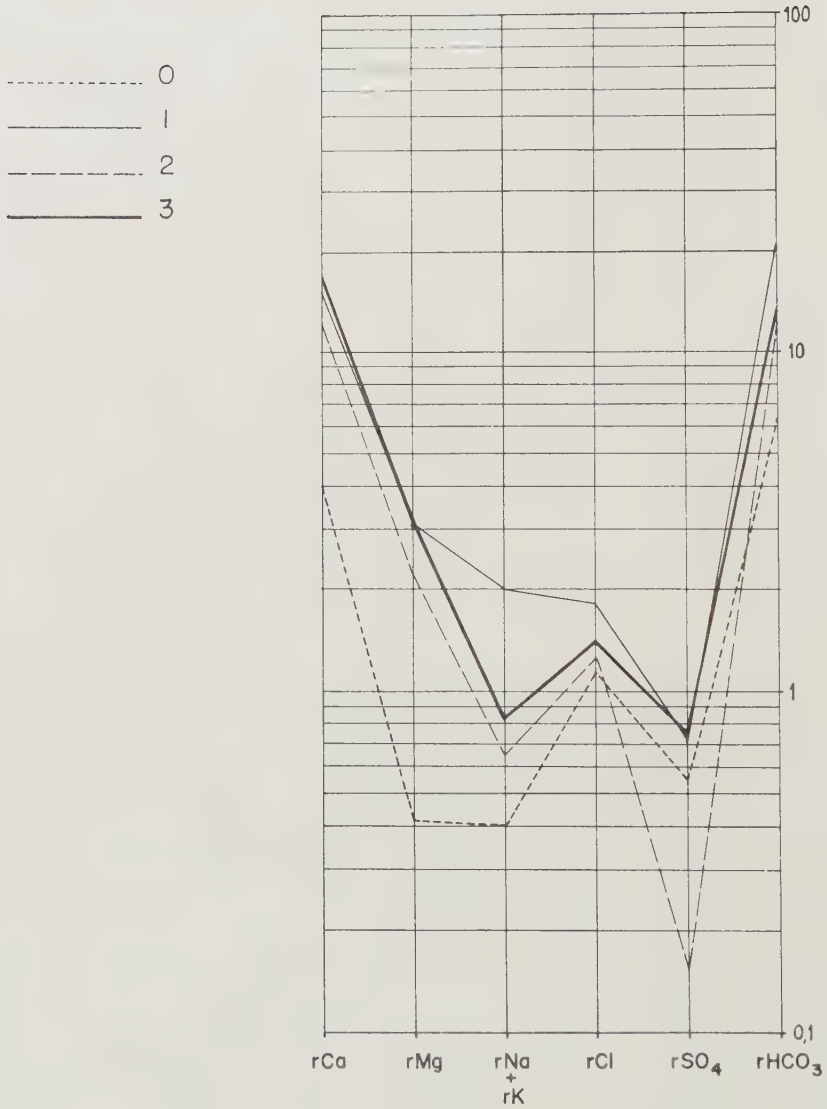



Fig. 5.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol de Pompignac (mai 1956), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : eau de la nappe sous-jacente; 1 : eau de l'horizon $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de C.

1° *Eau de dilution concentrée de manière que son volume soit égal au volume de l'humidité du sol* (tableau II)

*Variation en fonction de la profondeur.* — La composition chimique de l'eau ramenée au volume de l'humidité correspondrait à celle des solutions des sols.

La composition chimique de l'eau ramenée au volume des pores, correspondrait sensiblement à celle de l'eau d'infiltration. Comme les pores sont très fins, le volume de l'eau de rétention élevé est presque égal à celui des pores, de telle sorte qu'il ne peut y avoir que très peu de différence entre les deux concentrations chimiques.

Dans les sols de Baron et de Pompignac, on observe les teneurs et les variations suivantes des éléments en fonction de la profondeur.

Le fer et le manganèse n'existent qu'à l'état de traces. En effet, dans ces sols bruns, le fer est complètement floculé et fixé par l'argile, en présence de ions $Ca^{++}$, énergiques parce que peu hydratés et bivalents.

Le calcium est l'élément majeur des cations, on remarquera que sa teneur est minimum dans l'horizon $A_2$. La différence n'est pas très grande, mais elle est sensible. Le magnésium est ensuite l'élément le plus important parmi les cations. Comme le calcium, il présente un minimum dans l'horizon $A_2$. Toutefois, il faut remarquer un second minimum dans C pour le sol de Baron. Le rapport r Mg/r Ca est quelque peu variable. S'il décroît régulièrement vers la profondeur dans le sol de Baron, il n'en est pas de même dans le sol de Pompignac, où c'est l'inverse qui se produit.

La teneur en sodium est plus importante dans l'horizon $A_1$ que dans les horizons $A_2$ et C à Pompignac, tandis que le maximum a lieu dans $A_2$ à Baron. Cela est en partie imputable à des échanges de bases de Ca du terrain, contre du Na de l'eau, comme l'indique l'indice de déséquilibre chlore-alcalin.

En ce qui concerne le potassium, on observe une diminution générale vers la profondeur, quoiqu'à Pompignac il y ait un affaiblissement dans l'horizon $A_2$. Mais dans les deux sols, il y a très régulièrement un affaiblissement du rapport r K/r Na. Ce sens est très important : il montre la fixation sélective du K vers la profondeur.

La concentration en chlore augmente d'une façon à peu près régulière vers la profondeur à Baron; à Pompignac, c'est

l'inverse. Les sulfates voient leur concentration décroître dans les deux sols de l'horizon $A_1$ à $A_2$, tant à Baron qu'à Pompignac, puis croître jusqu'à l'horizon C. A Baron, les concentrations sont plus élevées qu'à Pompignac.

Les bicarbonates sont très élevés dans les deux sols, et ils décroissent vers la profondeur; c'est tout à fait normal, la teneur en gaz carbonique est plus élevée à la surface (surtout à cause de la végétation). Les nitrates ne se trouvent que dans le sol de Baron où la concentration croît avec la profondeur.

A l'horizon $A_1$, la silice est prépondérante à Baron, absente à Pompignac; aux autres horizons, la concentration est sensiblement égale.

Répétons que ces compositions chimiques doivent correspondre à celles des solutions des sols. La variation de la concentration des éléments est donc plus ou moins fonction de la profondeur. Ce qu'il faudrait surtout examiner, ce sont les valeurs relatives; ce que nous ferons par la suite. Néanmoins, nous pouvons retenir le fait suivant : dans les deux sols, à Baron et à Pompignac, on observe une concentration plus élevée dans l'horizon $A_1$ de Ca, Mg et $HCO_3$; cela peut être attribué à la plus grande production de $CO_2$ par oxydation biologique et chimique de la matière organique morte et à l'activité plus grande des organismes. Le $CO_2$ produit, met en solution les carbonates.

### 2° *Eau de dilution concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores* (tableau III)

Nous pouvons admettre que, dans ce cas, la composition chimique ainsi établie correspond à peu près à celle des eaux d'infiltration.

Comme nous le verrons à propos de l'étude des cases lysimétriques, la composition de l'eau d'infiltration dépend de l'intensité des chutes de pluie. Les premières pluies entraînent les solutions des sols qui se sont concentrées pendant la période d'évapo-transpiration. Les pluies suivantes de la période d'infiltration diluent ce qui reste des solutions des sols.

Il faut ajouter qu'une pluie, suffisante pour entraîner la solution du sol d'un horizon élevé, est souvent capable de lui faire traverser tout le sol. La solution s'arrêtera à un niveau plus bas. On pourra donc avoir dans un horizon intermédiaire des eaux plus concentrées ou moins concentrées que dans les horizons supérieurs et inférieurs.

Les valeurs relatives sont à prendre en considération plutôt que les valeurs absolues si l'on veut suivre l'évolution des solutions des sols vers la profondeur.

Néanmoins, on constatera les tendances suivantes : dans l'horizon $A_1$, les concentrations [1] en bicarbonates, calcium et magnésium, sont plus élevées que celles des autres horizons. Elles atteignent respectivement à l'horizon $A_1$ : 14,1; 7,21; 2,57 pour décroître régulièrement jusqu'à l'horizon C où elles atteignent les valeurs de 4,79; 1,56; 0,239 pour Baron et pour Pompignac à l'horizon $A_1$ : 12,6; 11,82 et 2,15; et à l'horizon C : 12,95; 14,8; 3,20. Cette augmentation dans l'horizon $A_1$ est normale par suite de la teneur plus grande du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère du sol (présence de la végétation, activité des micro-organismes), ce qui favorise la dissolution plus grande du calcium et des carbonates contenus dans le calcaire à Astéries.

Le potassium décroît en fonction de la profondeur à Baron de 0,319 à 0,042 et à Pompignac de 0,21 à 0,114, probablement par suite de l'absorption de cet élément par les plantes.

Le sodium a tendance à diminuer vers la profondeur puisqu'il passe à Baron de 0,81 à 0,19 et à Pompignac de 1,80 à 0,723, alors que le chlore a tendance à augmenter puisqu'à l'horizon $A_1$ à Baron, la concentration est de 1,56, alors qu'à l'horizon $B_1$ elle est de 2,009, mais à Pompignac les concentrations sont sensiblement égales à tous les horizons pédologiques. Nous verrons que cela doit être attribué à un échange de bases progressif vers la profondeur.

Les sulfates ont tendance à diminuer à l'horizon $A_2$ à Baron : 1,055 et à Pompignac 0,16.

Nous verrons mieux les variations en comparant les rapports (tableau IV) :

*$r\,SO_4/r\,Cl$ :* à Baron, les rapports sont relativement élevés; ils varient de 0,875 - 1,084, beaucoup plus qu'à Pompignac (0,365 - 0,373). Cela semble local. Ce qui ressort nettement, c'est une diminution sensible de ce rapport dans l'horizon $A_2$ : des deux points envisagés, il n'est plus que de 0,586 à Baron et de 0,124 à Pompignac. Cette diminution est due à une régression des sulfates, non à une augmentation en chlore. Nous n'en connaissons pas maintenant l'explication.

*$r\,Mg/r\,Ca$ :* les rapports sont normaux, aux alentours de 0,356, semblables à ceux que l'on est habitué de rencontrer

(1) Elles sont exprimées en milliéquivalents.

dans les eaux souterraines. Mais ils diminuent de l'horizon $A_1$ vers l'horizon B. A Baron, le rapport à l'horizon $A_1$ est de 0,356 pour décroître régulièrement jusqu'à l'horizon $B_1$, où il atteint 0,173. A Pompignac, il décroît de 0,194 à 0,181 de $A_1$ en $A_2$. La mise en solution des éléments magnésiens semble se faire plus facilement à l'horizon A. Toutefois, dans la roche-mère, à Pompignac, le rapport se relève à 0,278 à l'horizon C : il y a eu une reprise du magnésium. A Baron, au contraire, le rapport décroît de B en C mais lentement.

*r K/r Na :* à Baron, ce rapport diminue depuis l'horizon $A_1$ jusqu'à l'horizon $B_1$ (de 0,392 - 0,123). Il est logique d'attribuer cette diminution à l'absorption du potassium par la végétation. Cela trouve sa confirmation dans le fait qu'à Pompignac, où le sol est complètement dépourvu de végétation, on observe au contraire une croissance de ce rapport vers la profondeur.

*Les échanges de bases.* — Dans les deux sols, l'échange de bases devient de plus en plus positif vers la profondeur, i.e que vers la profondeur, il y a un échange progressif d'ions sodium et potassium de l'eau contre des ions calcium et magnésium du terrain. En effet, à Baron, depuis la surface, ils passent de + 0,273 à + 0,475 à l'horizon C. Au sommet, les permutoïdes ont tendance à être plus sodiques que calciques; il semble vraisemblable d'en donner l'explication suivante : pendant la période d'évapo-transpiration, les sels alcalins ont tendance à monter par capillarité.

*r (Na + K)/r Mg + r Ca :* ces échanges de bases modifieront naturellement le rapport des alcalins sur alcalino-terreux. Ce rapport aura tendance à augmenter en remontant vers l'horizon $A_1$; cela est très net à Pompignac (de 0,046 à l'horizon C à 0,105 à l'horizon $A_1$). A Baron, toutefois, le faible rapport de l'horizon $A_1$ (0,115), lié à un indice d'échange élevé, fait exception. Cela doit être dû à des variations locales dans la nature des terrains.

*r $HCO_3$/r Cl :* ce rapport traduit l'augmentation de la tension du gaz carbonique des horizons inférieurs, vers les horizons supérieurs, lieux de production du gaz carbonique : en effet, ce rapport à Baron est à l'horizon $A_1$ de 9,5; à l'horizon C, il n'est plus que de 4,4. A Pompignac, il est de 10,8 à l'horizon $A_1$ et 6,84 à l'horizon C.

### D. — Eaux des sols en un même point, mais en deux saisons différentes

Nous étudierons maintenant les eaux des sols en un même point, mais en deux saisons différentes. Cela doit nous permettre de mieux suivre l'évolution chimique dans le temps, car les phénomènes chimiques dans le sol sont loin d'être simples. Nous allons examiner l'évolution chimique à Baron, au mois de novembre et au mois de mai.

#### 1° *Eau de dilution dont le volume a été ramené à celui de l'humidité du sol* (tableau II)

D'une manière générale, la concentration en novembre est bien plus élevée qu'en mai pour tous les éléments, sauf pour le chlore. C'est ainsi qu'à l'horizon $A_1$, en novembre, la teneur était pour le calcium de 22 milliéquivalents, pour le magnésium de 8,21, le potassium 0,79, le sodium 3, les sulfates 2,53, et les bicarbonates 56,1, alors qu'au même horizon $A_1$, mais au mois de mai, les valeurs étaient respectivement de 8,39; 2,99; 0,371; 0,94; 1,588; 16,420. Nous verrons un phénomène semblable au cours de l'étude des cases lysimétriques. A la lumière des observations faites sur ces cases, nous pouvons admettre que les solutions des sols sont plus concentrées au début de l'automne qu'à la fin du printemps. En effet, au début de l'automne, il reste dans le sol des solutions qui ont été concentrées auparavant par évapotranspiration, tandis qu'au printemps, les solutions du sol sont encore sous l'effet du lessivage de la période d'hiver. Le chlore, en novembre, a une teneur moyenne de 1 milliéquivalent, alors qu'en mai il était monté jusqu'à 2 milliéquivalents en moyenne à tous les horizons pédologiques. Il est donc moins abondant en novembre qu'au mois de mai : c'est l'élément qui a été le plus facilement entraîné par les premières pluies. Il y a un départ sélectif, suivant la solubilité des éléments.

C'est encore aux tout premiers lessivages qu'il faut attribuer l'irrégularité dans la distribution verticale des éléments; les premières infiltrations poussent en vagues devant elles les éléments qui peuvent plus ou moins s'arrêter chemin faisant suivant l'intensité de la pluie, donc de l'infiltration.

### 2° *Eau de dilution dont le volume a été amené à celui des pores du sol* (tableaux III et IV)

Lorsqu'on compare les solutions des sols dont les volumes ont été ramenés à ceux des pores, on constate que les différences de concentration observées précédemment disparaissent.

On remarquera que dans les sols de mai et de novembre, la concentration du chlore s'accroît depuis l'horizon $A_1$ jusqu'en B régulièrement en mai, irrégulièrement en novembre; cette irrégularité est due à la vague d'infiltration. Au mois de mai, la hauteur de pluie a été plus grande qu'en novembre; le chlore, très soluble, descend par vagues, comme nous le verrons lors de l'étude des cases lysimétriques; en novembre, au contraire (fin de la période de sécheresse), il s'est produit une série de concentrations par évapo-transpiration, suivie d'une autre série de dilutions des eaux d'imbibition par l'eau d'infiltration qui descend, elle aussi, par vagues.

En ce qui concerne les sulfates, cet élément est plus abondant en $B_1$ qu'en $A_1$ : en novembre, à l'horizon $B_1$, la concentration était entre 1,95 et de 2,52 en $A_2$, alors qu'à l'horizon $A_1$ elles n'étaient plus que de 0,769, et au mois de mai les sulfates suivent également la même tendance; à l'horizon $B_1$ : 2,170; à l'horizon $A_1$ : 1,37 milliéquivalents. Nous remarquerons que les sulfates, en novembre, sont plus faibles qu'au mois de mai, et cela s'accorde avec le chlore qui, lui, est aussi en plus faible quantité (aux alentours de 1 milliéquivalent en novembre; en mai, de 2 milliéquivalents). Il y a donc eu un lessivage. Nous remarquerons également qu'à l'horizon $A_2$, il y a des inversions : un minimum en mai (1,055), alors qu'en novembre il y a maximum (2,52).

*$HCO_3$ :* la concentration en bicarbonates est toujours plus élevée au sommet qu'à la base, aussi bien en mai qu'en novembre. Nous avons expliqué plus haut ce phénomène. En novembre, la concentration décroît régulièrement depuis la surface vers la profondeur de 17,1 à 4,65, et en mai de 14,1 à 4,79. Il est à remarquer qu'aux horizons $A_1$ et $A_2$, au mois de novembre, la concentration en bicarbonates est plus élevée qu'au mois de mai, l'activité microbiologique étant plus grande.

*Ca et Mg :* le calcium et le magnésium n'appellent pas de remarques spéciales.

*K :* le potassium est plus faible en novembre qu'en mai, il est épuisé par la végétation : en novembre, à l'horizon $A_1$,

la teneur est 0,241, mais aux autres horizons elle est nulle, et en mai elle décroît de 0,319 à l'horizon $A_1$ pour atteindre 0,042 à l'horizon C.

*r $SO_4$/r Cl* est beaucoup plus élevé en novembre (de 1,33 à 2,70) qu'en mai (0,586 à 1,084). Cela peut s'expliquer facilement par le fait que les premières infiltrations ont entraîné beaucoup plus facilement les chlorures que les sulfates moins solubles.

*r (Na + K)/r (Ca + Mg) :* en novembre, il y a une décroissance régulière vers la profondeur du rapport r (Na + K)/ r (Ca + Mg) allant de 0,125 à l'horizon $A_1$ à 0,08 à l'horizon $B_1$, et en mai il y aurait plutôt augmentation. Peut-être est-ce en liaison avec le renversement des échanges de bases : cet échange de bases en mai croît de + 0,273 à 0,475 vers la profondeur, alors qu'en novembre il est au contraire négatif et croît en sens inverse i.e. vers le sommet de — 0,09 à la base et de 0,03 au sommet, alors que l'indice était positif et avait tendance à s'accroître vers la profondeur en mai, il est au contraire négatif et a tendance à s'accroître vers le sommet en novembre.

Pendant la période d'évapo-transpiration, les sels alcalins facilement solubles ont pu migrer par capillarité vers le haut et se fixer sur les permutoïdes et être remis en liberté lors des premières infiltrations, à un taux d'autant plus élevé qu'ils étaient plus abondants vers le haut; cela explique la valeur absolue plus faible de cet indice négatif, à l'automne, dans les horizons supérieurs.

## E. — Comparaison des eaux des sols avec celles des nappes souterraines sous-jacentes

Nous avons vu précédemment quelle était l'évolution chimique des eaux des sols dans le temps (c'est-à-dire suivant les saisons) et dans l'espace (c'est-à-dire en fonction de la profondeur). Il sera intéressant de faire maintenant la comparaison de la composition chimique des solutions des sols avec celle de l'eau souterraine sous-jacente.

### *Comparaison de la composition de l'eau de dilution, ramenée au volume des pores du sol, avec celle des eaux souterraines*

Si nous examinons les graphiques semi-logarithmiques de représentation des eaux, nous constatons qu'il y a une très

grande similitude entre les eaux des sols et les eaux des nappes souterraines sous-jacentes.

Les eaux souterraines peuvent varier de composition d'un point à un autre, mais elles varient de la même manière que les eaux d'imbibition des sols. L'allure des courbes de la composition chimique des eaux des nappes phréatiques est semblable à celle des eaux d'imbibition, tant à Baron qu'à Pompignac, bien que les compositions chimiques diffèrent d'un lieu à l'autre. La tendance générale des principaux rapports est sensiblement la même. La principale différence entre les eaux des sols de Baron et celles des sols de Pompignac réside dans l'indice d'échange de bases. A Pompignac, l'indice est plus grand qu'à Baron; on retrouve précisément la même différence dans les eaux souterraines.

De même, si l'eau du sol varie d'une saison à une autre, l'eau souterraine a tendance à suivre la même variation : en novembre, à Baron, l'eau d'imbibition et l'eau de la nappe phréatique sous-jacente ont tendance à se concentrer, tandis qu'en mai, ces mêmes eaux ont tendance à avoir une composition chimique plus faible par suite de la dilution provenant des eaux d'infiltration qui arrivent par vagues jusqu'à la nappe phréatique. La différence de concentration entre l'eau souterraine et l'eau du sol est faible. Elle est de même ordre de grandeur; tantôt un peu plus élevée, comme à Baron au mois de mai, tantôt un peu plus faible, comme à Baron au mois de novembre et à Pompignac au mois de mai. Cela signifie que l'eau a dissous, dans le sol agricole, presque tous les sels qu'elle renferme et qu'elle ne s'enrichit presque plus dans la zone d'aération et dans la nappe souterraine.

Les rapports des éléments entre eux restent semblables dans les eaux des sols et dans l'eau de la nappe. Les rapports r Mg/r Ca sont semblables. On ne trouve d'exception que dans l'eau de $B_1$ et de C du sol de Baron, en novembre 1954, exception qui peut être due à un phénomène secondaire tel qu'un échange de bases. Dans chaque sol, les rapports r $SO_4$/r Cl sont les mêmes. Toutefois, $SO_4$ a des valeurs plus faibles dans l'eau de C de Baron en 1954 et en 1956. Cette constance de la faible concentration en $SO_4$ à ce niveau, qui est d'ailleurs peu aéré, pourrait être attribuée à une réduction locale de $SO_4$. On observe le même phénomène dans l'eau de $A_2$ de Pompignac. Nous pouvons considérer cela comme accidentel.

Dans l'ensemble, les rapports r Na/r Ca + r Mg, r Na/r Mg restent tous semblables. Les variations constatées sont dues à des échanges de bases.

L'aspect général des graphiques logarithmiques montre bien cette parenté entre les eaux des sols et les eaux des nappes, et cela d'autant plus si l'on considère que la moindre variation absolue d'un élément due à une cause toute locale, amène une forte variation relative. Dans des eaux concentrées, des variations relatives semblables ne permettraient pas de juger de la parenté des eaux.

L'examen de ces graphiques nous montre en plus que, dans le sol, comme dans la nappe, les eaux sont bicarbonatées avec des teneurs qui varient de 7 à 20 milliéquivalents de $HCO_3$, et calciques de 2 à 18 milliéquivalents de Ca.

**C'est donc dans le sol que l'eau souterraine acquiert sa configuration chimique; il n'y a que peu de modifications au cours de l'infiltration dans la zone d'aération et au cours du cheminement de l'eau dans la nappe** (1). Dans le sol, la teneur en bicarbonates est, d'une manière générale, plus grande que dans l'eau souterraine.

Si, dans certains cas, **la concentration en $NO_3$ est nulle dans les eaux des sols, par contre elle est, dans la plupart des cas, supérieure à celle des eaux souterraines.** Dans l'eau des sols, elle peut atteindre 1,5 milliéquivalent, tandis que dans l'eau de la nappe, elle n'est que de 0,01 à 0,26 milliéquivalent.

Les rapports r K/r Na de l'eau du sol sont généralement supérieurs à ceux de la nappe souterraine. Ils varient aux divers horizons. A Baron, ils étaient de 0 à 0,263 (novembre 1954) et de 0,161 à 0,392 (mai 1956). A Pompignac, ils étaient de 0,115 à 0,158 (mai 1956), tandis que pour les nappes sous-jacentes ils étaient respectivement, à Baron, de 0,13 en novembre 1954, de 0,092 en mai 1956, et à Pompignac de 0,038.

---

(1) Cette conclusion ne s'applique ici qu'aux sols bruns lessivés de la région de Bordeaux. Elle s'appliquera également aux sols podzoliques. Nous sommes persuadé qu'elle s'appliquera à la majorité des cas, chaque fois que de nouveaux phénomènes de dissolution et d'attaque chimique n'auront pas la possibilité de se produire dans la zone d'aération et dans la zone de saturation des nappes.

## IV. — LES SOLS PODZOLIQUES

Dans ce chapitre, nous étudierons la composition chimique des eaux d'imbibition des sols podzoliques. Nous décrirons d'abord les coupes pédologiques des différents sols du Haillan, de Martignas et de Caupian; nous examinerons ensuite l'évolution chimique des éléments vers la profondeur. Tous ces sols reposent sur des sables éoliens et fluviatiles du Quaternaire.

### A. — Description des sols podzoliques étudiés

#### 1° *Sol de la carrière du Haillan (Gironde), février 1954* (fig. 6)

Situation : coord. Lambert 291,7 - 362,4. Le sol est sableux, purement siliceux (densité réelle : 2,65), avec de petits graviers, surtout au sommet. A la base de cette coupe naturelle,

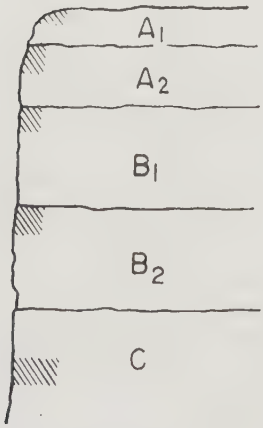



Fig. 6.

Sol de la carrière du Haillan (Gironde).

$A_1$ : sol gris foncé, 0,15 m; $A_2$ : sol gris cendré, 0,25 m; $B_1$ : sable ocre, 0,40 m; $B_2$ : sable ocre avec concrétion d'oxyde ferrique, 0,40 m; C : sable blanc.

il y a du sable blanc très fin. C'est un podzol classique, bien formé. En voici la coupe :

| | | |
|---|---|---|
| $A_1$ | : sol végétal gris foncé, avec racines .. | 0 - 0,15 m |
| $A_2$ | : sol gris cendré, avec racines ..... | 0,15 - 0,40 m |
| $B_1$ | : sable ocre ..... | 0,40 - 0,80 m |
| $B_2$ | : sable ocre, avec concrétions d'oxyde ferrique ..... | 0,80 - 1,20 m |
| C D | : sable blanc ..... | 1,20 - 3,60 m |

Les échantillons pour analyse ont été pris successivement à 0,05 m; 0,15 m; 0,40 m; 0,80 m; 1,30 m de profondeur. A la surface du sol, il n'y a pas de végétation. La nappe phréatique était à 3,10 m au-dessous du sol.

Les porosités des échantillons vont de 0,352 à 0,487. Avant la prise de l'échantillon, il y avait eu une période sèche et froide suivie d'une période d'infiltration qui n'était pas encore terminée : les valeurs d'humidité continuaient à augmenter vers la base.

Nous avons repris des échantillons à la même carrière, en avril 1955. Il y avait eu, à la fin du mois de mars, une période assez pluvieuse et douce ayant apporté dans le sol beaucoup plus d'humidité qu'en février 1954. Les échantillons ont donc été pris pendant une période d'infiltration.

### 2° *Sol de la carrière de Martignas, décembre 1955* (fig. 7 et 8)

Situation : coord. Lambert 355,5 - 287,3. Le sol est sableux, avec quelques graviers. Il y a ici une première zone très ferrugineuse, compacte, et une deuxième zone légèrement ferrugineuse avec des racines. C'est un sol podzolique bien formé.

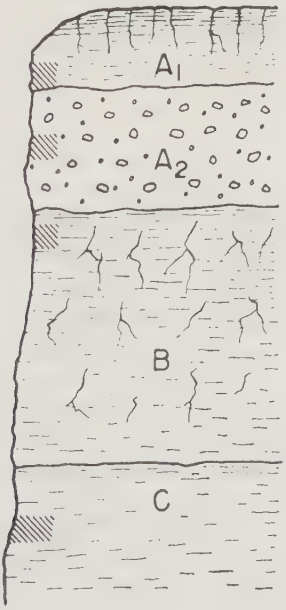



Fig. 7.

Sol de la carrière de Martignas (Gironde).

$A_1$ : sable humifère, 0,30 m; $A_2$ : sable gris cendreux à graviers, 0,50 m; B : zone à hydroxyde ferrique, 1 m; C : sable grossier, gris clair.

En voici la coupe :

$A_1$ : horizon à humus noir, sable fin, graviers et nombreuses racines ..... 0 - 0,30 m

$A_2$ : sable gris, cendreux, décoloré, avec quelques graviers ..... 0,30 - 0,80 m

B : zone très ferrugineuse, compacte, à tendance aliotique, et zone légèrement ferrugineuse avec racines ..... 0,80 - 1,80 m

C : sable grossier, gris clair, avec graviers blancs ..... 1,80 - 2 m

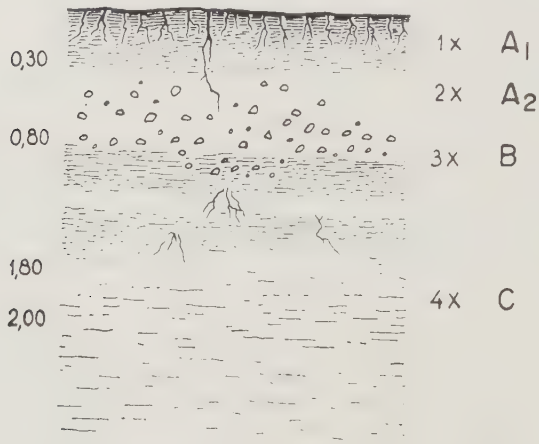



Fig. 8.

Sol de la carrière de Martignas (Gironde) vu de face, même légende que celle de la fig. 7.

La végétation est composée de fougères *(Pteris aquilina)* et de pins maritimes. Les échantillons ont été pris à 0,20 m; 0,50 m; 0,85 m; 2 m de profondeur. Les porosités vont de 0,320 - 0,382. Les degrés d'humidité sont sensiblement les mêmes.

### 3° *Sol de la carrière de Caupian, décembre 1955* (fig. 9)

Situation : coord. Lambert 356,2 - 290,05. C'est un sol podzolique bien formé sur du sable des Landes : il présente des zones noires et n'a pas, ou n'a que peu de graviers.

$A_1$ : sable graveleux noir ..... 0 - 0,30 m

$A_2$ : sable gris cendré ..... 0,30 - 0,90 m

B : au sommet, horizon très noir, de quelques centimètres, puis du sable ocre, s'éclaircissant vers le bas ..... 0,90 - 1,00 m

C : sable graveleux ocre clair ..... 1,00 - 1,70 m

Végétation : fougère aigle et pin maritime. Les échantillons ont été pris successivement à la surface, puis au-dessous, à 0,50 m; 0,90 m; 1,50 m de profondeur.

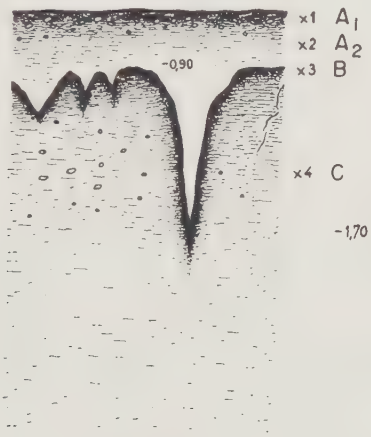



Fig. 9.

Sol de la carrière de Caupian (Gironde).

$A_1$ : sable graveleux noir, 0,30 m; $A_2$ : sable gris cendré, 0,60 m; B : sable noir au sommet, ocre en dessous, 0,10 m; C : sable graveleux ocre clair.

## B. — Analyses des eaux des sols podzoliques

Les tableaux d'analyses (V, VI, VII et VIII) des solutions des sols et de la nappe phréatique sous-jacente comprennent :

— Les analyses des eaux de dilution, exprimées en milliéquivalents par litre (tableau V) ;

— La composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal à celui de l'humidité du sol (tableau VI) ;

— La composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal à celui des pores (tabl. VII) ;

— Les rapports des éléments (tableau VIII).

### C. — Eaux des sols en deux points différents a la même date : Martignas et Caupian (décembre 1955)

Les tableaux précédents vont nous permettre de comparer les eaux.

#### 1° *Eau de dilution dont le volume a été ramené à celui de l'humidité du sol* (tableau VI)

L'eau de dilution doit avoir ainsi à peu près la composition de la solution du sol.

*Variations en fonction de la profondeur.* — Aussi bien à Martignas qu'à Caupian, le fer et le manganèse se trouvent seulement sous forme de traces dans tous les horizons pédologiques.

A Martignas, le calcium semble se concentrer en C; au contraire, à Caupian, il se concentre en A. Le magnésium n'existe pas à tous les horizons pédologiques à Martignas et à Caupian; quand il s'en trouve, il y a peu de variations entre les horizons, avec un minimum à l'horizon $A_1$.

Le potassium a tendance à s'accumuler vers le bas à Martignas; il existe seulement à Caupian, au sommet. Le sodium décroît de l'horizon $A_1$ jusqu'à l'horizon B, puis croît faiblement jusqu'à C à Martignas. A Caupian, les concentrations sont très élevées, surtout aux horizons $A_2$, B et C.

Les chlorures, à Martignas, subissent de fortes variations entre les horizons $A_1$ et $A_2$; ils décroissent vers la profondeur; à Caupian, au contraire, il y a deux maxima aux horizons $A_2$ et B, et deux minima en $A_1$ et C.

Dans les deux sols, il n'y a pas de sulfates. A Martignas, les concentrations des bicarbonates décroissent vers la profondeur, avec cependant un minimum à l'horizon $A_2$; il y a un maximum important dans $A_1$. A Caupian, il y a beaucoup moins de variations entre les horizons. A Martignas, pas de nitrates aux horizons $A_1$ et $A_2$; à Caupian, aux horizons $A_1$ et C. Les autres horizons en contiennent.

A Martignas et à Caupian, les concentrations de presque tous les éléments chimiques sont élevées.

Les hautes teneurs relatives des alcalins sont dues à la concentration des eaux par évaporation; elles étaient montées

pendant la période sèche, permettant ainsi une accumulation vers le haut. Les pluies qui ont suivi, ont dissous de nouveau ces sels et les ont entraînés vers le bas; ils sont beaucoup plus solubles que les alcalins terreux et les sulfates. Ce lessivage n'était certainement pas encore terminé, comme le montrent les hautes teneurs des chlorures et des alcalins au sommet.

*Comparaison avec la nappe phréatique sous-jacente* (fig. 11 et 12). — Dans les sols des deux carrières, les concentrations des eaux d'imbibition sont beaucoup plus élevées que celle de l'eau de la nappe phréatique sous-jacente. C'est que les échantillons ont été recueillis en période d'évapo-transpiration i.e. de remontée de l'eau à travers les pores du sol vers le sommet.

### 2° *Eau de dilution dont le volume a été ramené à celui des pores du sol* (tableau VII)

L'eau doit ainsi présenter une concentration analogue à celle de l'eau d'infiltration. Dans les eaux des deux sols, il y a du fer, ne serait-ce qu'à l'état de traces. Il en est de même pour le manganèse.

Les chlorures diminuent vers la profondeur; ceci est peut-être en liaison avec les phénomènes d'évapo-transpiration qui ont tendance à faire remonter vers la surface le chlore et le sodium.

Les teneurs en carbonates sont relativement faibles puisque les concentrations varient de 0,34 à 1,92 milliéquivalents; ceux-ci se concentrent toujours au sommet, ce qui est normal, la teneur en gaz carbonique du sol étant toujours plus élevée vers la surface, comme nous l'avons déjà vu dans un précédent chapitre. Il y a cependant quelques différences : à Martignas, il y a accumulation de calcium aux horizons $A_1$ et C; à Caupian, il s'accumule à l'horizon $A_1$; il est inexistant aux horizons B et C.

A Martignas, il n'y a nulle part de magnésium; à Caupian, il y en a au contraire en abondance à tous les horizons. Le potassium est très important à Martignas; il y en a seulement à l'horizon $A_1$, à Caupian.

En fait, il n'y a pas de différences sensibles avec les variations de l'eau de dilution dont le volume a été ramené à celui de l'humidité du sol. Il y a tendance à l'égalisation des teneurs, surtout pour les chlorures.

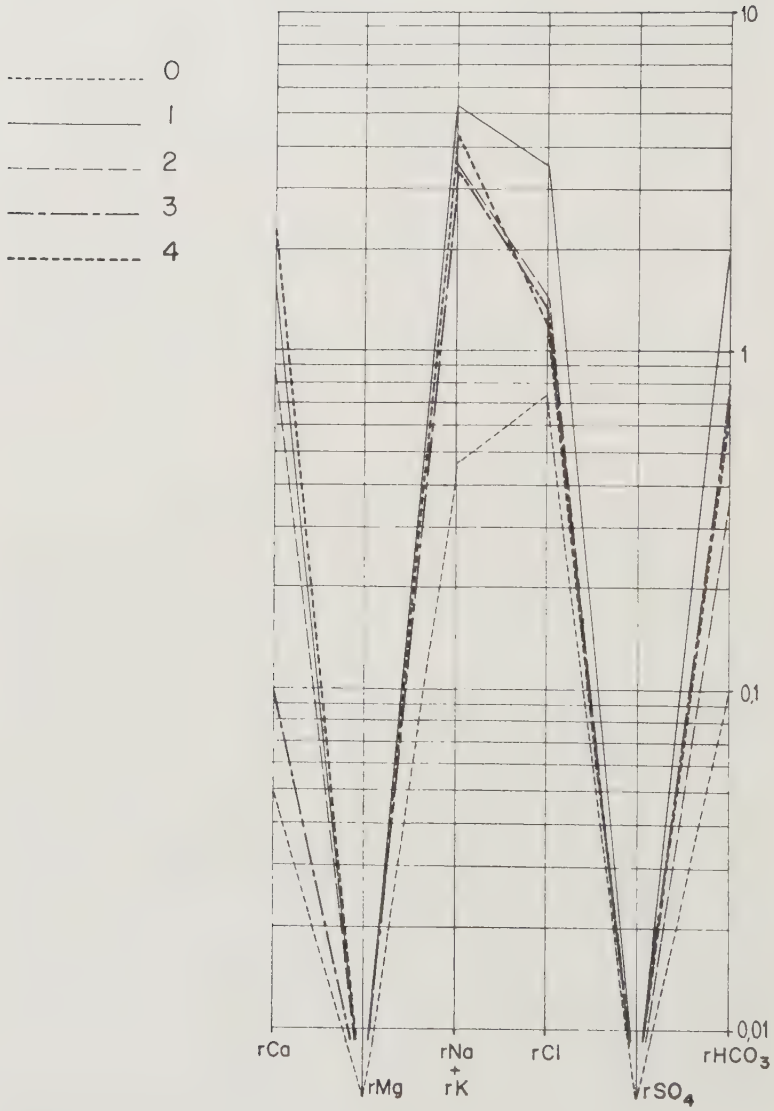



Fig. 11.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol de Martignas (décembre 1955), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : eau de la nappe; 1 : eau de $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de $B_1$; 4 : eau de C D.

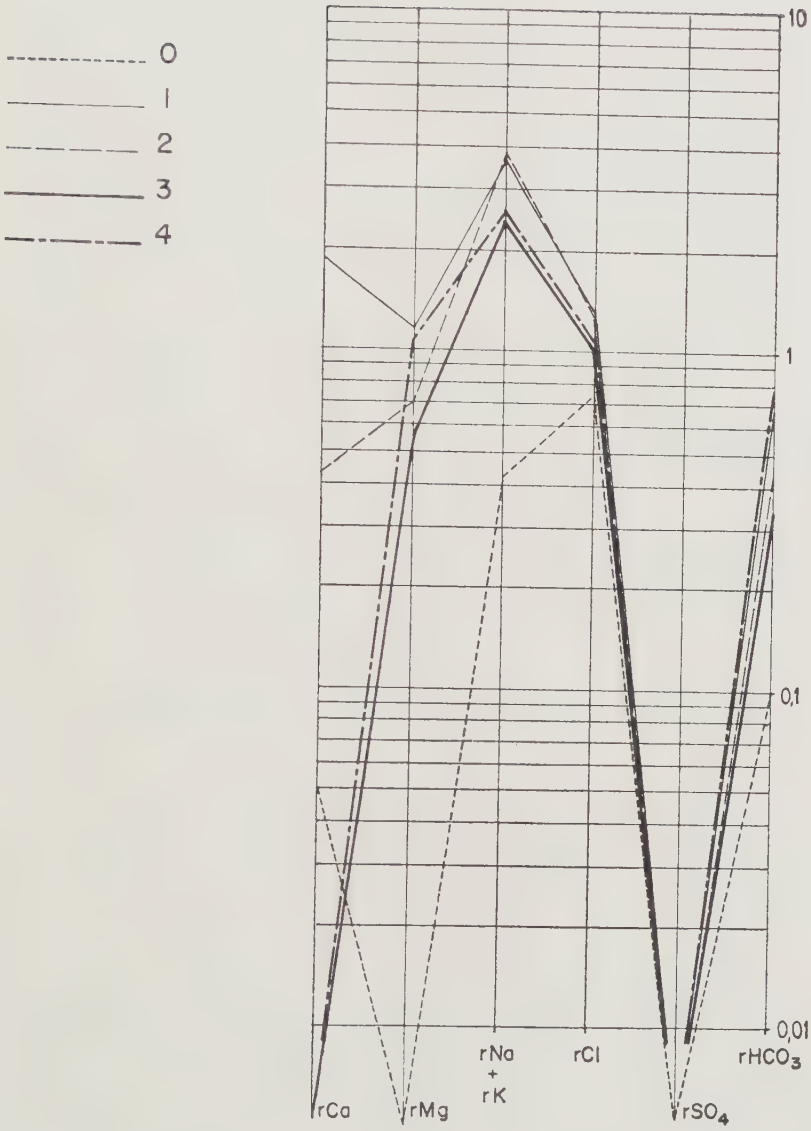



FIG. 12.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol de Caupian (décembre 1955), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : nappe sous-jacente; 1 : eau de $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de B; 4 : eau de C.

*Comparaison avec la nappe phréatique sous-jacente.* — D'une manière générale, la concentration des éléments chimiques des eaux de la nappe phréatique sous-jacente est inférieure à celle des eaux d'imbibition. Il y a ici un phénomène d'évapo-transpiration.

Si nous examinons les courbes semi-logarithmiques, nous voyons que l'eau de la nappe phréatique sous-jacente appartient à la même famille chimique. Elle en est le reflet : en effet, à Caupian, comme à Martignas, les concentrations en sodium sont relativement élevées par rapport à celles des alcalino-terreux. Il y a prédominance du chlore par rapport au calcium; les sulfates sont à peu près inexistants. Il n'y en a en effet que des traces indosables. Partout le rapport $r\,SO_4/r\,Cl$ est donc infiniment petit. Tout ceci confère bien une parenté très étroite. Cependant, il y a lieu de remarquer que, tandis que les eaux du sol ont un indice chloro-alcalin positif, celles de la nappe sous-jacente ont un indice chloro-alcalin négatif. Il en résulte qu'il y a dans les eaux de la nappe une diminution de Ca et du Mg. Ces échanges de bases ne sont qu'un phénomène secondaire qui ne modifie en rien la parenté.

### D. — Etude des eaux d'imbibition d'un même sol, mais a deux dates différentes : Haillan (Gironde) (février 1954 et avril 1955)

Nous allons étudier la composition chimique des eaux d'imbibition d'un même sol podzolique à deux saisons différentes, et nous ferons la comparaison avec la nappe phréatique sous-jacente.

#### 1° *Etude de l'eau d'imbibition du mois de février 1954*

##### a) *Etude chimique des eaux d'imbibition dont le volume a été ramené à celui de l'humidité mesurée du sol* (tableau VI).

Ces eaux doivent avoir ainsi une composition voisine de celle des solutions des sols.

Le calcium est nul dans $A_1$ et $A_2$; il est maximum dans $B_1$, décroissant vers C D. Le magnésium, nul dans $A_1$ et $A_2$, existe aux horizons B et C D. Le potassium présente des irrégularités dans les concentrations, la teneur variant de 0,09 à 1,12 milliéquivalents; le sodium varie peu; il a un maximum en $A_2$; le chlore est maximum dans deux horizons, en $A_1$ et en C D;

les sulfates sont minima aux horizons $A_1$ et C D; il n'y a pas de carbonates aux horizons $A_1$, $A_2$ et $B_1$; les concentrations en sont faibles en $B_2$ et C D.

Dans l'horizon A, il n'y a ni calcium, ni magnésium, ni carbonates. Dans l'horizon $B_1$, il y a du calcium et du magnésium, mais pas de carbonates. Aux horizons $B_2$, C et D, les trois éléments sont présents. Donc le lessivage complet en A, l'est déjà moins en B, et il diminue au fur et à mesure vers le bas. La haute teneur en $CO_2$ libre de l'eau à l'horizon A, de même que l'augmentation rapide du *p*H entre les horizons A et B et la chute rapide du $CO_2$ libre entre les mêmes horizons sont dues à la production du $CO_2$ libre dans l'horizon A et à son utilisation pour la dissolution et la transformation des carbonates de l'horizon B en bicarbonates.

La dissolution des sulfates est progressive jusqu'en $A_1$; les chlorures et les alcalins subissent peu de variations. Ils sont presque inertes et ne semblent pas influencés par les phénomènes pédologiques.

Si nous comparons ces eaux avec celle de la nappe phréatique sous-jacente, nous voyons que les concentrations sont sensiblement les mêmes. On se trouvait en pleine période d'infiltration : l'eau d'imbibition n'était pas concentrée par évapo-transpiration. C'était l'eau de rétention laissée dans le sol après infiltration, la faible concentration en sels correspond à celle de l'eau d'infiltration après le lessivage des terrains par les pluies antérieures.

b) *Eaux de dilution dont le volume a été amené à celui des pores du sol* (fig. 10) (tableau VII).

La composition chimique de ces eaux doit sensiblement correspondre à celle des eaux d'infiltration.

*Variations en fonction de la profondeur.* — Nous constatons que, contrairement aux données du précédent tableau, il n'y a pas de différences sensibles. Il y a tendance à l'égalisation des concentrations, surtout pour les chlorures.

L'examen des rapports montre que r $SO_4$/r Cl présente un maximum à l'horizon $B_1$; r Mg/r Ca est variable suivant les horizons; r K/r Na est maximum à l'horizon $B_2$.

Les concentrations en éléments sont plus faibles que celles de l'eau souterraine; cela est sensible surtout pour les chlorures, les sulfates et le sodium; dans le cas précédent, au contraire, la concentration des mêmes éléments était voisine

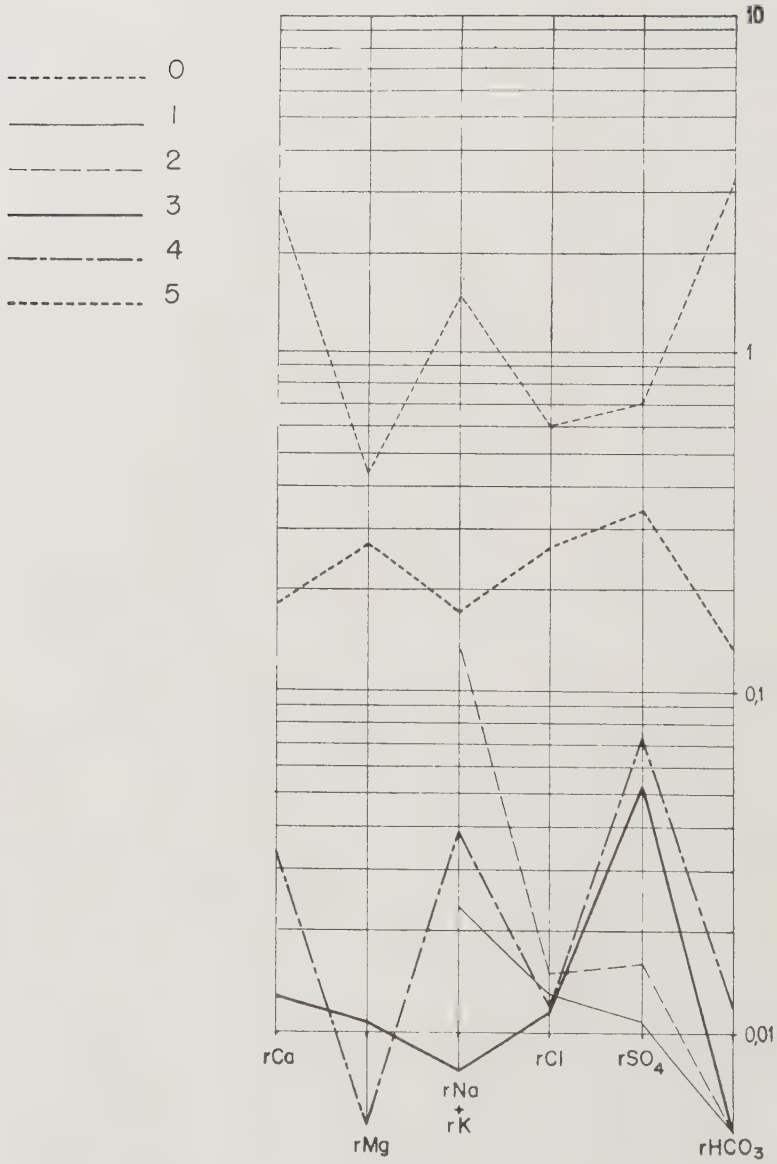



Fig. 10.

Composition chimique de l'eau de dilution du sol du Haillan (février 1954), et concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

0 : eau de la nappe sous-jacente; 1 : eau de $A_1$; 2 : eau de $A_2$; 3 : eau de $B_1$; 4 : eau de $B_2$; 5 : eau de C D.

eau d'imbibition ramenée au volume d'humidité). Cependant, dans les deux cas, la concentration en calcium et en magnésium de l'eau d'imbibition est bien plus élevée que dans l'eau souterraine. L'eau de la nappe phréatique sous-jacente appartient à la même famille chimique que les eaux d'imbibition, comme nous le montrent les graphiques semi-logarithmiques. L'eau est pauvre en carbonates, en calcium, en magnésium; les rapports r $SO_4$/r Cl, r Ca/r Na sont voisins; cependant, les carbonates et le calcium sont plus abondants que les autres éléments; vraisemblablement, les carbonates continuent à se dissoudre dans la zone d'infiltration de la roche-mère D, au-dessus de la surface de la nappe phréatique. Cette solution consomme encore du $CO_2$ libre qui descend ainsi de 78 mg/l au sommet de l'horizon D, à 27 mg/l dans la nappe.

### 2° *Etude de l'eau d'imbibition du mois d'avril*

Nous avons repris les échantillons exactement au même endroit qu'au mois de février; le degré d'humidité des échantillons est plus élevé qu'en février, par suite de la période pluvieuse de mars. Les échantillons ont été pris pendant une période d'infiltration.

*Eau de dilution dont le volume a été amené à celui de l'humidité du sol.*

Le fer n'existe que sous forme de traces, vraisemblablement parce qu'il s'est précipité dans le terrain à partir des solutions, l'eau étant passée de la phase active à la phase passive. Le manganèse n'existe pas à tous les horizons pédologiques; le magnésium, seulement aux horizons $A_1$ et $B_2$. Les concentrations sont très faibles : de l'ordre de 0,03 milliéquivalent par litre.

Le potassium existe dans tous les horizons avec un maximum en $B_1$ et C; le sodium croît jusqu'à $B_1$ puis décroît jusqu'en C. Il a des concentrations plus régulières que celles du potassium.

Les chlorures présentent un maximum en C et un minimum en $B_1$. Il en est de même pour les sulfates ($SO_4$ est absent en $B_1$). Les concentrations en carbonates ont tendance à s'égaliser dans tous les horizons, sauf cependant en $B_1$ où elles sont maxima.

Les nitrates sont présents à chaque horizon; les teneurs varient de 0,080 - 0,322 milliéquivalent avec un maximum à

l'horizon $A_1$ et un minimum à l'horizon $B_1$. Au sommet, il y a en effet des débris de racines qui permettent aux bactéries de proliférer.

Les teneurs très faibles en magnésium et en carbonates, dans tous les horizons pédologiques, sont en liaison avec un sol privé de calcaire.

Les concentrations sont, dans un grand nombre de cas, très proches de celles de l'eau de la nappe phréatique; la dilution est plus grande qu'en février; le lessivage a été plus complet. L'humidité du sol était plus grande qu'en février; les teneurs en nitrates sont sensiblement les mêmes. Les rapports $r\,SO_4/r\,Cl$ sont les mêmes dans le sol et dans la nappe.

Par contre, les rapports $r\,K/r\,Na$ sont plus grands dans l'eau d'imbibition; le potassium doit donc se fixer assez bas.

### 3° *Comparaison entre les eaux d'imbibition du mois de février et du mois d'avril*

Il s'agit d'un même sol, pris à des époques différentes, au mois de février, puis au mois d'avril. Le taux d'humidité n'était pas le même : en février, période sèche, il variait de 1,83 à 3,15 % suivant les horizons; en avril, période relativement humide, de 4,30 à 7,6, comme nous le montre le tableau suivant :

| Horizons | Février | Mars |
|---|---|---|
| $A_1$ | 1,83 | » |
| $A_2$ | 2,04 | 5,40 |
| $B_1$ | 2,30 | 4,30 |
| $B_2$ | 3,28 | 4,50 |
| C | 3,25 | 7,60 |

En avril, il y a une concentration plus élevée en Cl, $SO_4$, $NO_3$ et $CO_3$ dans l'horizon A que dans B; mais l'augmentation de ces éléments reprend après l'horizon B vers la profondeur : le lessivage part de A, entraîne les éléments à travers B. Ceux-ci se concentrent seulement vers le bas.

Au mois de février, au contraire, la concentration de ces éléments reste à peu près la même dans tous les horizons, l'eau étant au repos et pouvant ainsi se concentrer également; les

analyses le montrent nettement : en février, la concentration des chlorures allait de 0,763 à 0,520 milliéquivalent; au mois d'avril, elle allait de 0,11 à 0,20 milliéquivalent suivant les horizons pédologiques.

Les variations de concentration ont amené des modifications des rapports entre eux : r Mg/r Ca est plus petit qu'en février; en avril, r $SO_4$/r Cl, [r Cl - r (Na + K)]/r Cl sont plus grands. $SO_4$ a moins varié que Cl par suite de sa moins grande solubilité. Peut-être, les variations des rapports des cations sont-elles dues à une modification des conditions d'échanges de bases. Là encore, nous retrouvons dans les eaux souterraines, un calque des eaux d'imbibition. Elles ont varié de la même façon.

**Il résulte de cette comparaison que la composition chimique des solutions d'un même sol podzolique doit varier avec les saisons et avec le degré d'humidité du sol.**

### E. — Comparaison des eaux d'imbibition des podzols avec celles des nappes d'eau souterraine sous-jacentes

Les tableaux des analyses chimiques ou les graphiques semi-logarithmiques nous montrent avec évidence que la composition des solutions des sols podzoliques est très semblable à celle des nappes phréatiques sous-jacentes. Les rapports des éléments chimiques sont sensiblement les mêmes, ainsi que les concentrations.

Ainsi, à Caupian et à Martignas, les concentrations en Ca, Mg et en $HCO_3$ ont tendance à être faibles et les rapports r (Na + K)/r (Mg + Ca), r (Na + K)/r Ca sont élevés. Les rapports r $HCO_3$/r Cl, r $HCO_3$/r $SO_4$ ont tendance à être faibles (vers 0) aussi bien pour les solutions des sols que pour les eaux de la nappe phréatique.

Au Haillan, les parentés paraissent moins évidentes; cela vient d'une légère modification de la composition chimique de l'eau en passant d'un horizon à l'autre; le rapport r $SO_4$/r Cl croît de $A_1$ en $B_2$, et l'indice chloro-alcalin subit des oscillations. Mais la composition chimique de l'eau de C D, qui est le produit final des phénomènes chimiques dans le sol, a un lien très étroit avec la composition chimique de l'eau souterraine. En particulier, un des rapports caractéristiques les plus importants, r $SO_4$/r Cl, est sensiblement le même dans les deux eaux. Les différences dans les rapports entre les bases

sont simplement dues à un phénomène secondaire, les échanges de bases.

Il y a lieu de remarquer que lorsqu'il s'agit d'eaux à faible concentration, il est nécessaire d'adopter une méthode assez souple dans les comparaisons géochimiques : car à la moindre variation en valeur absolue des éléments correspond une variation relative importante. Il est donc souvent nécessaire de considérer l'allure générale.

## V. — EAUX DES SOLS PODZOLIQUES DANS LES CASES LYSIMÉTRIQUES DU CENTRE D'HYDROGÉOLOGIE - GÉOCHIMIE DE TALENCE.

Nous avons exposé plus haut quelle était l'évolution chimique des eaux d'imbibition en fonction de l'espace et du temps dans deux terrains pédologiquement différents. Nous avions utilisé la méthode par dilution, par manque de matériel adéquat malgré l'inconvénient qu'elle présente : obligation de calculer chaque fois les concentrations vraies en partant d'une base arbitraire.

Il nous fallait donc étudier dans le sol lui-même le comportement des différents éléments chimiques suivant la profondeur et suivant le temps. L'eau de pluie (p. 11 et suivantes) contient en petites quantités de nombreux éléments chimiques : bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, silice, calcium, magnésium, sodium, potassium. Tous ces éléments entrent dans le sol lors de l'infiltration et subissent des concentrations par évapo-transpiration, en même temps que des éléments du sol se dissolvent.

### A. — Etablissement des cases lysimétriques

Nous avons construit des lysimètres dans le champ expérimental attenant au Laboratoire du Centre d'Hydrogéologie - Géochimie de la Faculté des Sciences à Talence.

Ces lysimètres sont faits par une cuve en tôle : ils ont la forme indiquée par la figure 13. Pour les placer dans le sol podzolique, nous avons creusé une tranchée de 1,50 m de largeur environ. Puis nous les avons présentés, dépourvus de leur paroi arrière (a), devant l'entaille de la tranchée. Ils ont été enfoncés horizontalement, à l'aide d'un vérin hydraulique, sans que le sol ne soit ni déplacé, ni dérangé. Une fois en place, une tranchée étroite a été creusée à l'arrière pour

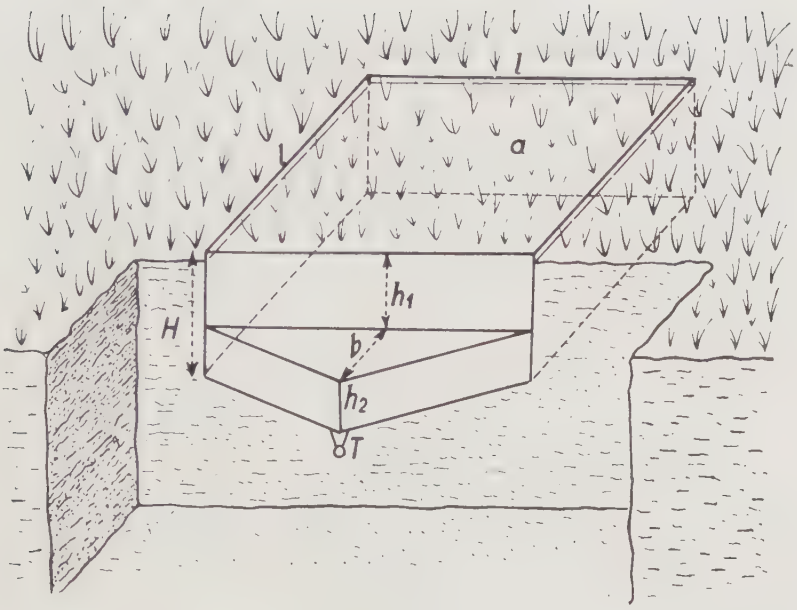



Fig. 13.

Un lysimètre du Centre d'Hydrogéologie - Géochimie de la Faculté des Sciences de Bordeaux.

pouvoir fermer le lysimètre de ce côté, à l'aide d'une tôle qui s'ajuste parfaitement à la cuve. Les joints ont été obturés.

L'eau s'accumulant sur le fond en tôle du lysimètre, est récoltée par le tube T qui s'ajuste à un bidon de plastique placé au fond de la tranchée. Un premier lysimètre $D_1$ a été glissé à la base de l'horizon A, à 0,15 m de profondeur; un deuxième $D_2$ dans l'horizon B, à 0,35 m de profondeur; un troisième $D_3$ au sommet de l'horizon C, à 1 m.

Les dimensions des lysimètres (fig. 13) sont les suivantes, exprimées en mètre.

| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| Côtés l | 1 | 1 | 1 |
| Hauteurs H | 0,20 | 0,38 | 1,05 |
| — $h_1$ | 0 | 0,18 | 0,85 |
| — $h_2$ | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Avancée b | 0,31 | 0,31 | 0,31 |

Pour éviter la succion, nous avons isolé complètement les côtés des lysimètres; les parois remontent à 2 cm au-dessus de la surface du sol. Dans chacun des lysimètres, la couverture végétale, surtout composée de graminées, avait été conservée.

Nous avons pu ainsi recueillir intégralement les eaux de drainage en provenance de ces trois horizons. Un pluviomètre enregistreur et un pluviomètre ordinaire avaient été placés à quelques mètres de distance des cases. Nous avons pu ainsi dresser le bilan de l'eau entrée dans les lysimètres et de l'eau qui en est sortie, et calculer l'évapo-transpiration.

## B. — Pluviométrie

Les résultats des mesures de hauteur de pluie (exprimés en millimètres) sont les suivants :

| | 1959 | 1960 | 1961 | 1962 |
|---|---|---|---|---|
| Janvier | 68,0 | 62,4 | 137,7 | 181,9 |
| Février | 10,7 | 89,6 | 44,9 | 35,5 |
| Mars | 50,0 | 77,1 | 0 | 38,4 |
| Avril | 91,0 | 14,0 | 65,5 | 0 |
| Mai | 58,1 | 75,8 | 18,9 | 14,0 |
| Juin | 42,0 | 41,3 | 33,8 | 5,8 |
| Juillet | 56,1 | 28,7 | 25,1 | 38,1 |
| Août | 52,7 | 94,5 | 55,0 | 18,1 |
| Septembre | 71,6 | 174,9 | 9,5 | 49,3 |
| Octobre | 135,6 | 211,1 | 113,2 | 50,3 |
| Novembre | 74,3 | 171,7 | 134,5 | 73,4 |
| Décembre | 240,5 | 131,5 | 104,8 | 79,8 |
| Année | 950,6 | 1 172,6 | 742,9 | 584,6 |

## C. — Analyses chimiques
(fig. 14, 15 et 16 - tableaux IX, X, XI)

Nous étudierons le mouvement des éléments chimiques dans les divers horizons du sol, leur comportement pendant les différentes périodes de l'année, et nous comparerons les résultats à ceux de la nappe phréatique sous-jacente.

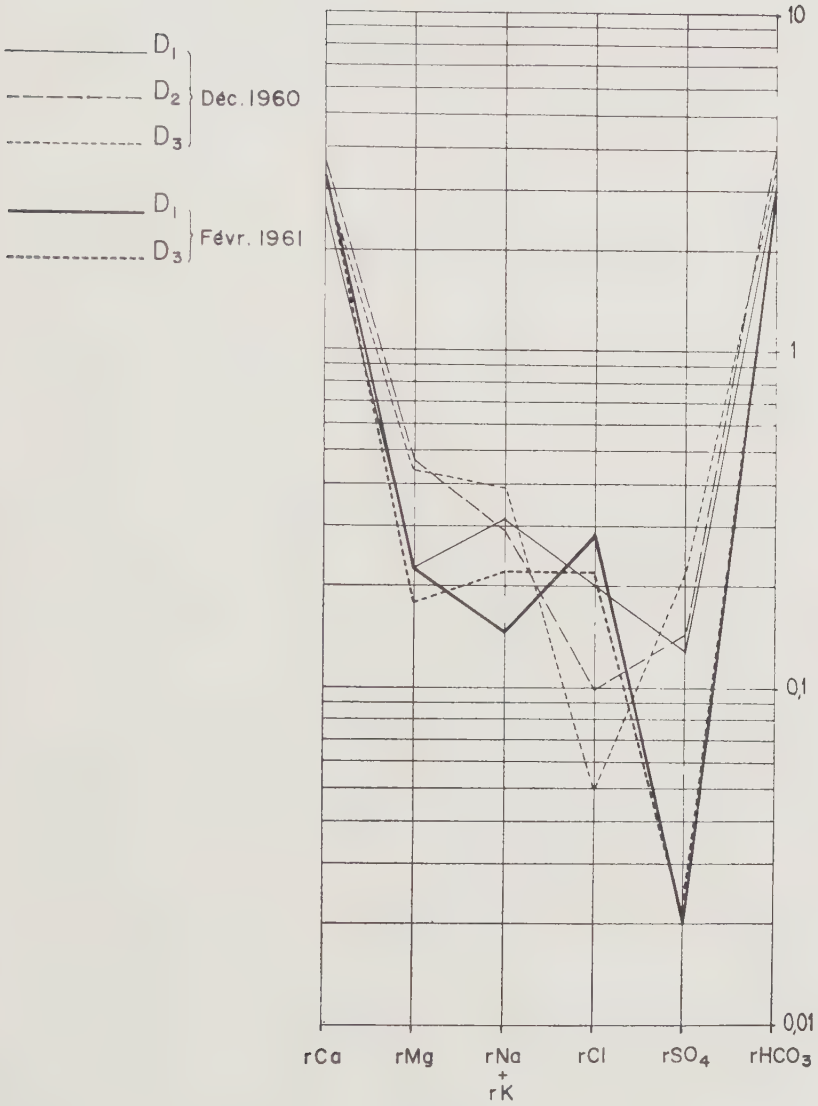



Fig. 14.

Composition chimique des eaux de drainage des cases lysimétriques, en décembre 1960 et en février 1961.

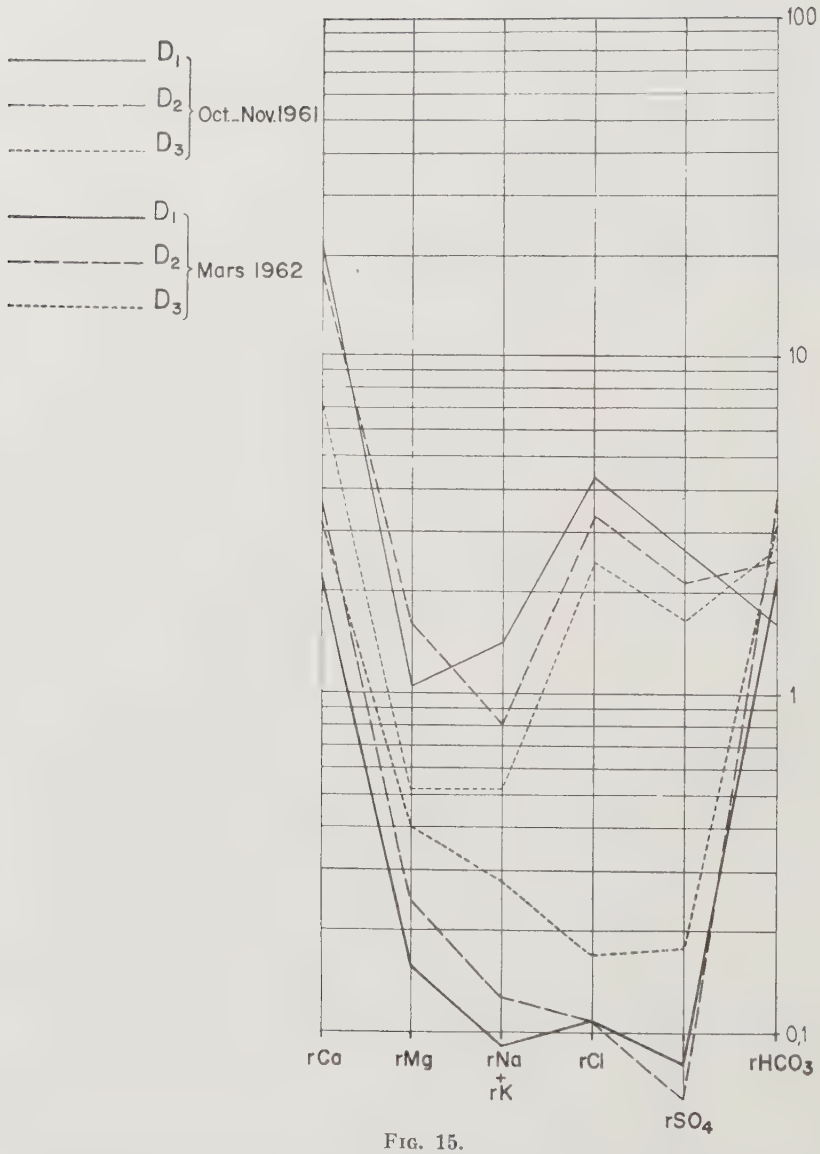



Fig. 15.

Composition chimique des eaux de drainage des cases lysimétriques, en octobre - novembre 1961, et en mars 1962.

Des analyses chimiques des eaux de drainage des trois cases lysimétriques ont été faites en décembre 1960, février 1961, octobre - novembre 1961 et en mars 1962. Chacune de ces périodes correspond à un régime hydraulique déterminé des cases lysimétriques.

Pendant la saison pluvieuse, allant de l'automne au printemps, la quantité de pluie qui tombe est supérieure à celle qui est retirée par évapo-transpiration. Il y a donc infiltration qui lessive le sol, d'autant plus que la hauteur de pluie est plus élevée. On se trouve en période de lessivage.

Du printemps à l'automne, c'est l'inverse qui se produit. L'évapo-transpiration est plus élevée que la hauteur de pluie. Il n'y a plus aucun drainage des cases lysimétriques. L'eau contenue dans le sol se concentre de plus en plus sous l'effet de l'évapo-transpiration.

A l'automne, dès que l'évapo-transpiration devient plus faible que la pluviométrie, l'eau d'infiltration traverse tout le sol, mais en repoussant l'eau concentrée emmagasinée dans la période précédente. Cette chasse de l'eau concentrée ne dure que très peu de temps; elle est vite remplacée par l'eau normale. C'est la période de libération des sels emmagasinés.

Nous aurons des eaux concentrées de la période de libération (octobre - novembre 1961) et des eaux peu concentrées de la période de lessivage (décembre 1960, février 1961 et mars 1962). Il est nécessaire d'anticiper sur les résultats obtenus au cours du bilan des cases lysimétriques, afin de mieux pouvoir comprendre les évolutions de la composition chimique.

### D. — Mouvement des éléments chimiques des solutions dans les divers horizons pédologiques (fig. 14 et 15)

Examinons les mouvements de chacun de ces éléments :

*Le chlore.* — La tendance la plus générale est une décroissance de la concentration en chlore vers la profondeur. Les eaux s'étaient concentrées pendant l'été, par évapo-transpiration dans les horizons A et B, tandis que C n'en subissait pas l'influence. Au début de la libération, il est naturel que ces eaux superficielles soient très concentrées et gardent encore une certaine concentration, au moins au début de la période de lessivage.

*Les sulfates.* — Le phénomène est inverse, il y a un accroissement de la concentration vers la profondeur, au moment du lessivage; au moment de la libération, ce sont les solutions des horizons les plus élevés qui sont les plus riches. Cela peut être dû à la remise en solution plus difficile du $CaSO_4$ que du NaCl.

*Les bicarbonates.* — Au moment du lessivage, aussi bien qu'au début de la période de libération, la concentration en $HCO_3$ croît de l'horizon A à l'horizon C. Pendant ces deux périodes, la dissolution des carbonates se poursuit vers la profondeur. Il n'y a dans le sol que peu de carbonates; l'eau ne peut donc se saturer dans l'horizon A. La décalcification du sol se poursuit jusqu'en C et même au-delà puisque la concentration en $HCO_3$ de l'eau de la nappe est encore plus élevée.

*Le calcium.* — En période de libération, le calcium décroît vers la profondeur. Il est lié aux sulfates bien plus qu'aux bicarbonates. Peut-être aussi, y a-t-il influence des échanges de bases. En période de lessivage, il y a un maximum en B, ce qui est normal, $HCO_3$ et $SO_4$ variant en sens contraire. Le minimum est dans A, où a lieu le maximum de lessivage.

*Le magnésium.* — Souvent, durant les périodes de libération, le magnésium est maximum en B et minimum en C; en période de lessivage, il est minimum en A et maximum en B ou C.

*Le sodium.* — En période de lessivage, le sodium croît toujours avec la profondeur, tandis qu'il décroît en période de libération. Dans les deux cas, c'est l'inverse du mouvement du chlore; cela est dû, sans aucun doute, à un retard de mouvement, en liaison avec les échanges de bases qui jouent le rôle de volant; cet échange de bases n'est certainement pas sans relation avec la distribution du calcium et du magnésium, telle qu'on vient de le dire.

*Le potassium.* — Lorsqu'il y a une concentration supérieure à 2 mg/l, il décroît vers la profondeur. Il semble donc être retenu en surface.

Si nous étudions maintenant les différents rapports et caractéristiques, nous voyons que :

$r\,SO_4/r\,Cl$ croît vers la profondeur (il y a toutefois une exception en mars 1962). Cela semble prouver que même si l'on admet que tout le chlore provienne de l'eau de pluie, une partie des sulfates a son origine dans le sol;

$r\,Ca/r\,HCO_3$ décroît toujours avec la profondeur; il y a en effet augmentation de $HCO_3$ avec la profondeur, comme nous l'avions déjà vu plus haut;

$r\,Mg/r\,Ca$ : faibles variations irrégulières, donnant une tendance à un rapport restant toujours à peu près égal à lui-même;

$[r\,Mg + r\,Ca]/[r\,Na + r\,K]$ : il y a toujours un maximum en B où il y aurait donc fixation des alcalins et libération des alcalino-terreux;

$[r\,Cl - r\,Na]/r\,Cl$ : cet indice d'échange de bases minimum en B, sauf en mars 1962, est conforme aux échanges de bases déjà indiqués par le rapport précédent.

## E. — Comparaison entre la période de lessivage et la période de libération dans les cases lysimétriques

Comparons les eaux de drainage du mois de décembre 1960, période de lessivage pour laquelle nous avions des analyses des eaux de toutes les cases et celles de mois d'octobre - novembre 1961, période de libération.

### 1° *Case lysimétrique $D_1$*

En comparant la période de lessivage de décembre 1960 à la période de libération d'octobre - novembre 1961, on constate une augmentation de tous les éléments. Les éléments qui varient le plus — et de beaucoup — sont :

Cl : il augmente de $\frac{155}{7,1} = 23,8$ fois; Ca de $\frac{415}{53,2} = 7,8$;

$SO_4$ de $\frac{123}{6,58} = 18,7$ fois; Na n'augmente que de $\frac{20,5}{5} = 4,1$;

K de $\frac{19}{4} = 4,75$ fois.

Les bicarbonates, eux, diminuent de 176,9 ou 186 mg à 98 mg/l.

On voit ainsi que le fort mouvement du calcium est lié au mouvement des sulfates et que le sodium doit être très influencé par les échanges de bases.

### 2° *Case lysimétrique $D_2$*

Il y a aussi augmentation de concentration de tous les éléments (sauf pour les bicarbonates) des eaux de la période de libération comparée à celle des eaux de la période de lessivage.

Comme pour $D_1$, les éléments qui varient le plus sont : le chlore, les sulfates, le calcium, qui augmentent respectivement pour : Cl de $\frac{159}{3,55} = 44,9$ fois; $SO_4$ de $\frac{103}{7} = 14,7$, et le calcium de $\frac{325}{70,8} = 4,59$ fois, alors que le sodium n'augmente que de $\frac{14}{5} = 2,80$ fois; les bicarbonates, eux, diminuent, passant de 237,0 à 125 mg/l.

Les phénomènes se reproduisent donc en $D_2$ et même beaucoup plus nettement qu'en $D_1$.

### 3° *Case lysimétrique $D_3$*

Il y a la même augmentation de tous les éléments, avec des vitesses différentes, sauf pour les bicarbonates dont la concentration varie en sens inverse. Les concentrations augmentent pour Cl de $\frac{86}{1,77} = 48,5$ fois; $SO_4$ de $\frac{80}{20,28} = 39,4$; Ca de $\frac{143}{64,8} = 2,2$, et enfin Na de $\frac{9}{7,3} = 1,23$ fois.

Les bicarbonates diminuent lorsqu'on passe de la période de lessivage à celle de libération. Donc, les sulfates et le chlore augmentent plus vite; le sodium est moins affecté, sans doute y a-t-il phénomène d'échange de bases.

Si nous étudions les rapports, nous voyons que :

$[r\,Cl - r\,Na]/r\,Cl$ est plus positif en période de libération qu'en période de lessivage. Le calcium est libéré et le sodium est retenu pendant la période d'évaporation, tandis que l'inverse a lieu pendant les périodes d'infiltration.

$r\,Ca - r\,HCO_3$ est très élevé en période d'évaporation; il est bas et même négatif en période d'infiltration, ce qui confirme ce que nous avancions plus haut.

*En conclusion :*

Le chlore vient en tête partout. Il subit, plus que les autres éléments, les effets dus à l'évapo-transpiration, au lessivage par les pluies; les variations des conditions climatiques interviennent donc largement.

Viennent ensuite, par ordre de décroissance, les sulfates, le calcium et le sodium. Pour ce dernier élément, il y a sans doute phénomène d'échanges de bases par suite de la présence de matière argileuse.

Avec la profondeur, les rapports des concentrations de chlore croissent; ils passent de 23,8 à 48,5; il en est de même pour les sulfates.

Résumons ici, les variations des éléments sous forme de tableau :

| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| Cl | 23,8 | 44,9 | 48,5 |
| $SO_4$ | 18,7 | 14,7 | 39,4 |
| Ca | 7,8 | 4,6 | 2,2 |
| Na | 4,1 | 2,8 | 1,2 |
| $HCO_3$ | 0,56 | 0,64 | 0,71 |

L'examen du précédent tableau nous montre qu'il n'y a diminution des rapports vers la profondeur que pour le calcium (7,8 - 2,2) et le sodium (4,1 - 1,2). Au contraire, les rapports de concentration des bicarbonates augmentent de 0,56 à 0,71.

Les variations les plus importantes sont celles du chlore et des sulfates. Cela tient à ce que ces anions ne subissent aucune modification du fait du terrain. C'est dans les cases profondes que la variation est la plus importante, puisqu'elles peuvent garder davantage d'eau concentrée sans qu'intervienne autant l'évapo-transpiration.

Les variations des cations sont d'autant moins importantes que les cases sont plus profondes. Cela s'explique par la nature des terrains : le terrain a tendance à se comporter comme un volant chimique.

Pour les bicarbonates, la variation est plus grande en surface parce qu'elle est due, surtout, à l'influence de la végétation et des combustions biologiques dans le sol.

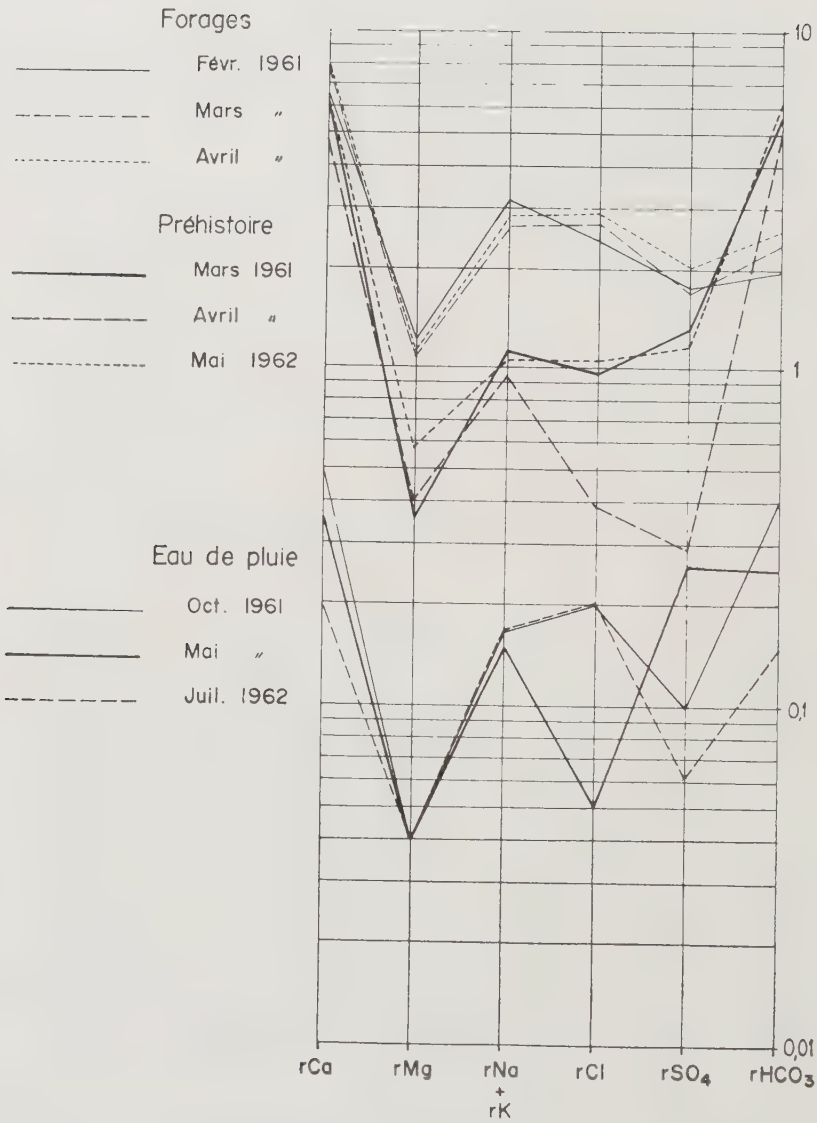



Fig. 16.

Composition chimique des eaux du forage, et du puits de la préhistoire, et de l'eau de pluie.

Nous voyons ainsi, d'après cette étude, **qu'en période de lessivage, les eaux ont une composition différente de celle de la période de libération d'automne.**

**En somme, les eaux de la période de libération ont : leur concentration plus élevée en tous les éléments; une augmentation plus grande des alcalins terreux que des alcalins; l'échange de bases devient positif.** Les colloïdes doivent sans doute jouer un rôle de volant. En période d'évaporation, ils fixent les alcalins Na + K et les cèdent avec retard en période de lessivage. Il y a une concentration plus constante des sulfates par rapport aux chlorures.

### F. — Comparaison avec la nappe souterraine sous-jacente (fig. 14, 15 et 16 - tableaux IX, X, XI, XII, XIII et XIV)

Le terrain des cases lysimétriques se trouve au-dessus d'une nappe libre peu profonde qui s'alimente par sa propre surface. Il était donc intéressant de rechercher une liaison hydrogéologique et géochimique entre les eaux d'infiltration et les eaux de la nappe.

Précisons que la nappe se trouve à une profondeur de 6 m en été, de 5,4 m en hiver dans des sables et graviers alluvionnaires quaternaires reposant sur le Calcaire à Astéries du Stampien. L'épaisseur de ce Quaternaire est assez variable, 10 à 20 m en moyenne. A 2 m du lysimètre n° 1, un forage donne la coupe suivante des terrains :

0 - 0,80 m : terre végétale;
0,80 - 1,36 m : alios;
1,36 - 3,30 m : sable fin;
3,30 - 6,75 m : sable avec gravier;
6,75 - 7,00 m : sable très argileux;
7,00 - 10,40 m : sable grossier;
10,40 - 12,25 m : galets et graviers blancs;
12,25 - 12,65 m : argile rouge sableux.

Le niveau d'eau est à 6 m de profondeur.

Cette nappe a son origine à 5 km au S.-W. Les courbes piézométriques montrent un écoulement régulier vers le N.-E. La perméabilité de l'aquifère mesurée au forage précédent varie de 0,7 à 0,02 l/sec. m², selon qu'il est formé de gravier ou de sable fin. La transmissivité au forage est de $7{,}04 \times 10^{-4}$ m³/sec. m, ce qui donne pour perméabilité moyenne au forage de 0,12 l/sec. m². Il n'y a aucun imperméable au-dessus de la

nappe qui est libre. Toute la zone d'aération est, en effet, formée de sable et de graviers.

La nappe peut être ainsi alimentée par sa propre surface. Même l'eau qu'elle reçoit de l'amont est une eau d'infiltration. Il n'y a aucune alimentation arrière.

Ainsi, toute infiltration verticale, se faisant en même temps sur toute la surface de la nappe, produit une hausse du niveau de celle-ci. Autrement dit, toute l'eau participant à la hausse de la nappe est de l'eau d'infiltration directe. Si donc localement une eau d'infiltration ayant une forte concentration se produit, elle atteindra la partie supérieure de la nappe à la *verticale de la zone d'infiltration*. Seuls les filets liquides profonds de la nappe proviennent de l'amont.

Naturellement, un certain temps est nécessaire pour que l'eau d'infiltration atteigne la nappe, en particulier à l'automne. La pluie doit d'abord satisfaire le déficit d'eau de rétention provoquée par l'évapo-transpiration intense de la fin du printemps et de l'été. Et ensuite elle doit passer de pores en pores dans la zone de rétention jusqu'à la surface de la nappe. Nous avons pu mettre nos observations sur les précipitations pluviales, l'infiltration, en relation avec les mouvements de la surface de la nappe, enregistrés à l'aide d'un limnigraphe Richard installé sur un puits situé à 40 m des lysimètres, devant le laboratoire de la Préhistoire.

Nous pensions faire nos comparaisons chimiques avec l'eau du forage tout proche des lysimètres. Mais l'analyse nous a donné une teneur très élevée en chlore, aux alentours de 94 mg/l, et une concentration très élevée en nitrate, 302,5 mg/l [1]. L'eau de la nappe a donc été polluée en ce point, et cela par un ancien dépôt de matières organiques situé à une vingtaine de mètres de distance.

Nous avons eu alors recours à l'eau du puits de la Préhistoire. Du mois de février 1961 au mois d'août 1961, nous y avons constaté une diminution générale importante de la concentration des éléments chimiques. Le chlore passe de 35 à 14 mg/l et les sulfates de 60 à 14 mg/l. Seuls les bicarbonates n'ont que peu varié. La diminution de concentration des cations n'est sensible que pour le calcium qui passe de 122 à 94, et le sodium de 20 à 16 mg/l. Les autres éléments n'ont que peu varié.

---

(1) Après un pompage intensif de plusieurs jours, la teneur en chlore est même montée jusqu'à 168 mg/l.

La concentration la plus élevée est en février, alors qu'à ce moment, elle est minimum dans les cases lysimétriques. Au mois d'août, par contre, la concentration de l'eau du puits est faible. Il n'y avait pas d'eau de drainage à ce moment-là dans les lysimètres. Nous attribuons cela au fait que l'alimentation de la nappe n'a eu lieu que bien longtemps après les premières infiltrations dans le sol; cela est confirmé par l'observation du mouvement du niveau d'eau du puits. La première remontée de la nappe dans le puits date du 27 décembre 1960, alors que la première infiltration dans les cases lysimétriques $D_2$ et $D_3$ est du 7 octobre 1960. Il a donc fallu 81 jours pour que la première eau d'infiltration gagne la nappe qui est à une profondeur de 6,58 m à partir de la surface du sol.

Nous attribuons la haute concentration de l'eau du puits, en février, au fait que la vague du chlore n'a pu arriver qu'après le 27 décembre. Comme dans la case lysimétrique $D_3$, elle a d'abord dû repousser l'eau de rétention moins concentrée de la zone d'aération de la nappe située sous la zone d'évapo-transpiration. Elle n'a donc pu se faire sentir qu'après, sous forme de vague atténuée, i.e. moins concentrée que dans $D_3$ et peut-être aussi plus longue.

L'examen des courbes semi-logarithmiques des eaux de drainage et de l'eau du puits « Préhistoire » nous montre qu'elles sont semblables : il y a prédominance des bicarbonates et du calcium dans l'eau du puits comme dans les eaux de drainage. Le rapport r Mg/r Ca du puits est identique à celui des cases lysimétriques. Le rapport r $SO_4$/r Cl présente les mêmes variations que celles des cases lysimétriques, toutefois moins fortes; il en est de même pour les échanges de bases.

La concentration de l'eau du puits est intermédiaire entre celle de l'eau de lessivage et celle de l'eau de libération, ce qui s'explique par le fait que la vague de haute concentration de la première infiltration s'amortit au fur et à mesure de sa descente.

# VI. — ÉTUDE DU BILAN DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES, DU CHLORE EN PARTICULIER, DANS LES CASES LYSIMÉTRIQUES

## A. — Introduction

Nous venons d'étudier la composition chimique des eaux d'imbibition de différents sols de la région bordelaise, et celle des cases lysimétriques. Cette étude nous a montré que, contrairement aux autres éléments chimiques, le chlore subit peu d'influence de la part du terrain. Il est surtout affecté par les phénomènes d'évapo-transpiration. Le chlore, qui semble bien être pratiquement inerte vis-à-vis du terrain, pouvait donc nous servir d'élément déterminant pour calculer le coefficient d'alimentation des nappes, moyen relativement simple et peu coûteux par rapport aux moyens hydrologiques habituels.

Pendant trois ans, nous avons étudié le comportement du chlore des eaux de drainage des cases lysimétriques dans le temps et suivant la profondeur. Parallèlement, nous avons dosé le chlore de l'eau de toutes les pluies. Nous avons ainsi effectué 586 analyses portant sur le chlore de l'eau de pluie et parallèlement sur celui des cases lysimétriques.

Dans le bilan, l'évapo-transpiration joue un rôle déterminant. Elle comprend à la fois l'évaporation directe, qui se fait physiquement à partir de l'eau contenue dans le sol, et l'absorption de l'eau par les racines des végétaux. L'eau ainsi absorbée entre dans la constitution des tissus et sert à la transpiration par les parties aériennes, par les feuilles en particulier.

L'évaporation directe est relativement moins grande que la transpiration, parce qu'elle ne peut atteindre que les profondeurs faibles, 0,50 m dans un sable, 0,70 m dans un terrain argileux. L'eau qui se trouve en profondeur dans le sol ne peut en effet arriver à l'air que par une diffusion extrêmement lente de l'eau à l'état de vapeur et de liquide. Cette vitesse de diffusion $dQ/dt$ est d'autant plus faible que le gradient d'humidité $dH/dZ$ du sol est plus faible, comme l'a montré Hallaire (1957) :

$$\frac{dQ}{dt} = A \frac{dH}{dZ} + B$$

H étant la quantité d'eau contenue dans 100 g de terre, et Z la profondeur du sol au point considéré. A est un facteur dépendant de la nature du sol et B le débit assuré par le déplacement d'ensemble d'un filet liquide de la profondeur jusqu'à la surface où se fait l'évaporation. On voit donc qu'au bout d'un certain temps, l'évaporation devient extrêmement faible. La quantité d'eau ainsi évaporée au cours d'une année dépend non seulement de la nature du sol, de la température et de la sécheresse de l'air, de l'intensité des vents, mais aussi du rapprochement des chutes de pluie. Ainsi l'évaporation annuelle pourra être faible dans les régions arides à pluies très espacées, tandis qu'elle sera élevée dans une région à climat humide, surtout s'il est chaud.

L'évaporation par la transpiration joue un rôle beaucoup plus important que l'évaporation physique parce qu'elle peut se faire à des profondeurs beaucoup plus grandes. Les plantes herbacées descendent leurs racines de 2 à 4 m et la luzerne de 10 à 15 m. Les arbres peuvent atteindre ces mêmes profondeurs.

On conçoit que le volume d'eau ainsi absorbé et transpiré puisse être très grand. La plante prend de l'eau dans le sol jusqu'à épuisement, c'est-à-dire jusqu'à ce que la teneur en eau s'abaisse jusqu'au coefficient de flétrissement. Une plante absorbe un poids d'eau égal de 300 à 1 000 fois le poids de tissus formés (exprimé en matière sèche). Cette proportion dépend de la nature de la plante, du climat et de la quantité d'eau disponible. En effet, le mouvement de l'eau à travers la plante dépend à la fois de la facilité avec laquelle l'eau peut être livrée à la plante, et de la capacité de l'atmosphère à provoquer la perte d'eau par transpiration.

### B. — Le chlore de l'eau de pluie
### Concentration - Variations

La concentration moyenne en chlore de l'eau de pluie à Talence, est aux environs de 5 mg/l (5,3 en 1959; 3,1 en 1960; 5,2 en 1961).

La concentration en chlore de l'eau de pluie peut s'élever jusqu'à 38 mg/l, valeur atteinte le 28 décembre 1960, ou jusqu'à 40 mg/l le 15 juillet 1961. D'ailleurs, la concentration diminue rapidement pendant les jours qui suivent les premières chutes de pluie.

Cette grande variabilité de concentration est due à des phénomènes météorologiques. Les vents venant de l'Ouest i.e. de l'Océan transportent les embruns salés de la mer, nous l'avons précisé dans une note (M. Schœller, 1960). Eriksson (1958) et d'autres ont d'ailleurs montré que des particules de NaCl des embruns peuvent être transportées par les vents souvent jusqu'à une grande distance des océans.

La quantité totale de chlore apportée par la pluie avait été, du 25 septembre 1959 au 17 septembre 1960, de 4 666 mg/m², avec une concentration moyenne de 5,3 mg/l; du 17 septembre 1960 au 10 octobre 1961, de 5 883 mg/m² avec une concentration moyenne de 3,1 mg/l. C'est pendant la période de septembre à février que la pluie apporte la plus grande partie du chlore, ce qui est dû à l'intensité plus grande des vents dominants venant de l'Océan pendant cette période de l'année. En 1959, la pluie, durant cette période, avait apporté 4 020 mg/m² de chlore, soit une moyenne de 6,9 mg/l, alors qu'en 1960 cet apport avait été de 4 519 mg/m², soit une moyenne de 5,4 mg/l de Cl. Pendant le restant de l'année, il était de 646 mg/m² en 1960, soit une moyenne de 1,8 mg/l, et de 1 364 mg/m² en 1961, soit une moyenne de 5,3 mg/l. *C'est donc pendant l'hiver que la pluie livre la plus grande partie de son chlore.*

## C. — Le chlore de l'eau dans les cases lysimétriques

### 1° *Etudes des variations de concentration*

Pour procéder à l'étude du chlore des eaux des cases lysimétriques, nous avons dressé toute une série de graphiques : graphiques de la concentration en chlore de l'eau de pluie et de l'eau de chacune des cases lysimétriques en fonction du temps et graphiques des quantités cumulées de chlore de l'eau de pluie tombée par mètre carré (fig. 17) et des quantités de chlore de l'eau drainée par chacune des cases lysimétriques (fig. 17).

L'examen d'ensemble des graphiques nous montre que, dans toutes les cases lysimétriques, dès le début de la reprise du drainage, les premières eaux ont une concentration élevée qui s'accroît très rapidement pour aboutir en peu de jours à un maximum qui est indiqué dans le tableau suivant :

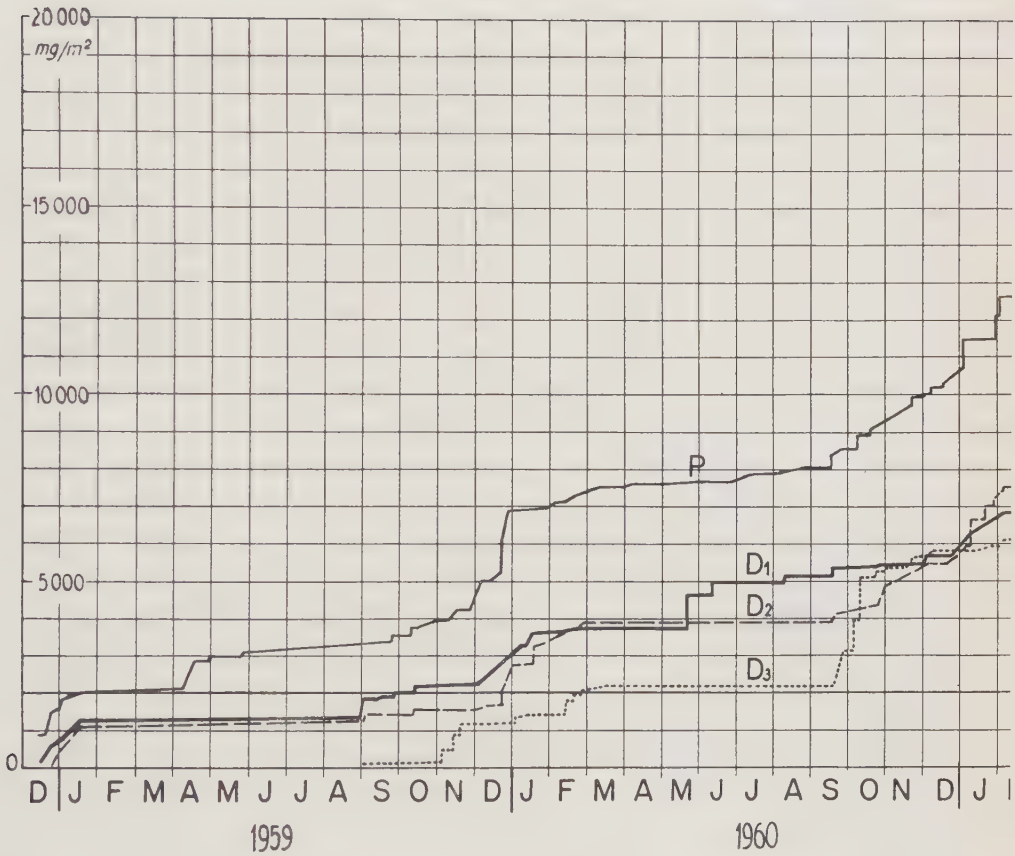
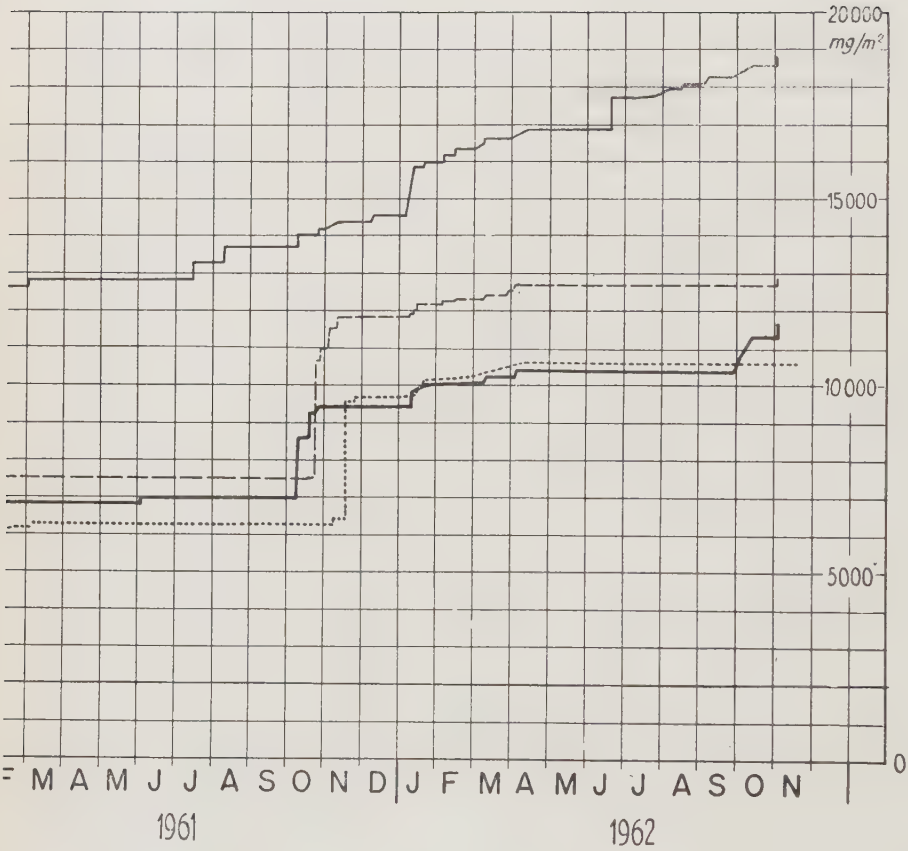



Fig. 17.

Courbes cumulatives des quantités de chlore drainées par les cases lysimétri




ques $D_1$, $D_2$ et $D_3$, et des quantités de chlore apportées par la pluie.

| Années | $D_1$ (mg/l) | $D_2$ (mg/l) | $D_3$ (mg/l) |
|---|---|---|---|
| 1959 ..... | 21,5 | 19,5 | 37,5 |
| 1960 ..... | 6 | 8 | 48 |
| 1961 ..... | 155 | 367 | 142 |

Il y a donc une « chasse » du chlore emmagasiné pendant la période d'évapo-transpiration, puis libéré avec les premières eaux de drainage. Les graphiques le montrent très nettement, c'est toujours au moment de la reprise du drainage qu'on observe le maximum de concentration.

D'autre part, on constate entre les trois lysimètres, un décalage du début de l'arrivée de la vague de chlore; en voici les dates :

| Années | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| 1959 ..... | 1er septembre | 1er septembre | 13 octobre |
| 1960 ..... | 17 septembre | 17 septembre | 19 septembre |
| 1961 ..... | 10 octobre | 20 octobre | 8 novembre |

Les cases les plus profondes drainent le plus tardivement; c'est normal : en effet, dans ces cases, étant donné le plus grand volume de sol soumis à cette évapo-transpiration, il y a un déficit total d'eau de rétention plus grand. L'eau de pluie ne peut gagner le fond du lysimètre qu'après avoir totalement comblé le déficit d'eau de rétention.

La durée de la période de haute concentration est d'autant plus longue que les cases lysimétriques sont plus profondes.

| Années | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| 1959 ..... | 19 jours | 19 jours | 33 jours |
| 1960 ..... | 2 — | 4 — | 21 — |
| 1961 ..... | 16 — | 21 — | 25 — |

Cela tient à ce que, dans les cases lysimétriques profondes, le volume d'eau intéressé par l'évapo-transpiration est plus

grand que dans les cases peu profondes. La vague d'eau douce qui s'infiltre aura donc à repousser un volume d'eau salée plus grand et mettra plus de temps à arriver au fond.

On comprend maintenant pourquoi, à la reprise du drainage, $D_3$ d'une manière générale donne l'eau la plus concentrée (*cf.* tableau p. 77). C'est en effet en $D_3$ que l'évapo-transpiration a pu agir sur le plus grand volume d'eau de rétention, tandis que dans $D_2$ et surtout dans $D_1$, les végétaux n'avaient à leur disposition qu'une ressource faible d'eau et se sont flétris bien avant la végétation de $D_3$ qui a pu continuer à fonctionner. D'un autre côté, au moment des premières infiltrations effectives, la dilution de l'eau concentrée par un même volume d'eau de pluie a été moins grande dans les cases profondes où le volume d'eau à diluer était plus grand.

Cependant, en 1961, la concentration en $D_3$ était plus faible qu'en $D_2$ et $D_1$. C'est qu'ici, en $D_2$ et $D_1$, la forte concentration d'été a été immédiatement repoussée par la première pluie, sans qu'il y ait mélange. On comprend que ce phénomène de refoulement de l'eau salée dépend de l'intensité et de la durée de la pluie.

Il est évident que plus la période d'évapo-transpiration est longue, plus la concentration de l'eau de rétention doit être grande en $D_3$. C'est ce que l'on observe ci-dessous :

| Année | Durée | Concentration (en mg/l) |
|---|---|---|
| 1959 ..... | 5 mois | 37 |
| 1960 ..... | 6 — | 47 |
| 1961 ..... | 8 — | 142 |

Et cette concentration est augmentée par l'apport des sels de l'eau de pluie tombant en été, car cette eau de pluie est entièrement reprise par évapo-transpiration.

Immédiatement après cette période de haute concentration, il y en a une, de faible concentration, avec des variations plus ou moins importantes. La décroissance plus lente en $D_2$ qu'en $D_1$ diminue encore en $D_3$, $D_1$ étant plus lessivé en raison de la faible épaisseur du terrain, et ainsi de suite.

Une fois le sol de ces trois lysimètres bien lessivés par les eaux d'infiltration, les concentrations des eaux de drainage restent relativement faibles, avec des variations plus ou moins importantes, qui suivent les variations en chlore de l'eau de

pluie. En 1959, le chlore des lysimètres, après la période de « chasse », était resté aux alentours de 2,5 à 3 mg/l, tandis que l'eau de pluie avait une teneur de 4 mg/l environ. On le voit par l'allure calme des courbes de concentrations.

Les courbes de concentration de l'eau de pluie peuvent présenter une série de pics de 10 à 17 mg/l de Cl, ce qui provoque quelques jours plus tard l'apparition d'une série de pics de 12 à 19 mg/l de Cl dans les eaux de drainage de $D_1$ et $D_2$, tandis que les eaux de la case $D_3$ sont moins perturbées. En 1960, il ne s'était pas produit de grandes variations dans la concentration de l'eau de pluie, il n'y a pas eu non plus de grandes variations en chlore dans les eaux de drainage.

Il peut arriver que la case $D_1$ donne de l'eau de drainage pendant l'été, mais c'est toujours de l'eau très concentrée par évapo-transpiration et chassée par l'infiltration. Le 21 mai 1960, l'eau de drainage de la case $D_1$ avait une teneur de 45 mg/l; le 11 juin, elle était encore élevée : 24 mg/l; le 28 avril 1961, la case $D_1$ avait une teneur de 37 mg/l, et le 3 juin, 17 mg/l.

Les observations que nous avons faites sur les trois lysimètres peuvent être appliquées à la nappe sous-jacente observable au puits de la Préhistoire. L'eau y est à 6,58 m de profondeur sous le sol. Dans le puits, la concentration maxima en chlore de l'eau se produit en février; elle présente des valeurs minima au mois d'août. C'est l'inverse de ce qui a lieu dans les cases lysimétriques; cela peut facilement s'expliquer :

En effet, la nappe s'alimente par sa propre surface. Si les filets liquides profonds proviennent de l'eau infiltrée en amont, il n'en est pas de même des filets liquides supérieurs en période d'alimentation. Ils sont essentiellement formés par l'eau d'infiltration arrivant à leur verticale d'un point très proche en amont. En période pluvieuse, le terrain situé au-dessus de la nappe, sans être saturé d'eau, renferme une quantité d'eau supérieure à la capacité de rétention. Il contient en effet les filets liquides d'infiltration. En période sèche, ce même terrain ne renferme plus que de l'eau de rétention dont le volume diminue au fur et à mesure que le temps s'écoule, car l'égouttement d'un sol est toujours très long. De plus, pendant la période sèche, cette zone de rétention est surmontée de la zone d'évaporation à déficit d'eau de rétention; ce déficit étant d'autant plus grand que la période de sécheresse a été plus longue et plus sévère.

La première remontée de la nappe dans le puits date du 27 décembre 1960, alors que le premier drainage dans $D_2$ et $D_3$ eut lieu le 7 octobre 1960. Il a donc fallu 81 jours pour que la première infiltration gagne la nappe. Mais la première eau atteignant la nappe a été l'eau de rétention du terrain en dessous de la zone d'évapo-transpiration, c'est-à-dire de l'eau douce provenant des dernières infiltrations de l'hiver - printemps précédent. La vague d'eau concentrée de la zone d'évaporation n'est arrivée qu'après, en février. Naturellement, la vague s'amortit en profondeur. Aussi, la teneur en Cl de l'eau du puits n'est que de 35 mg/l au moment du maximum. En août, elle est de 14 mg/l.

### 2° *Les apports et les livraisons de chlore*

La période de lessivage est plus ou moins intense et plus ou moins longue suivant les années. La période de non drainage est aussi variable. Il est enfin à remarquer que le chlore de la vague de haute concentration comprend non seulement le chlore de l'eau de pluie qui vient de s'infiltrer, mais également tout le chlore emmagasiné pendant la période sèche et même peut-être une partie de celui de la fin de la période pluvieuse précédente.

On peut donc considérer que la fin de chaque période de lessivage est le moment où les conditions de drainage risquent de rester à peu près les mêmes d'une année à l'autre. Le sol est à son plein d'humidité, tout le chlore en réserve, ou presque, a été chassé par le lessivage d'hiver. On peut donc prendre cette fin de chaque période de lessivage comme point de repère, tout en n'oubliant pas qu'il peut rester une certaine quantité de chlore emmagasiné. Dans ces conditions, la quantité de chlore évacuée entre deux périodes de cessation de drainage doit être égale à la somme de chlore apporté par la pluie, de celui que la végétation a fixé et d'un emmagasinement possible.

Si nous superposons la courbe du chlore cumulé de l'eau de pluie à celle du chlore cumulé de l'eau de drainage, en faisant coïncider le chlore de l'une et de l'autre au moment de la cessation du drainage, il y a deux cas possibles :

— Lorsque la courbe cumulative de l'eau de pluie est au-dessus de la courbe cumulative de l'eau de drainage, il y a emmagasinement du chlore dans le sol.

— Lorsque la courbe cumulative de l'eau de pluie est au-dessous de celle de l'eau de drainage, il y a livraison du chlore emmagasiné dans le terrain.

Nous devrons tenir compte, dans ces bilans partiels, de l'emmagasinement du chlore dans les végétaux lors de leur croissance et de la livraison du chlore des végétaux morts. Voici les résultats obtenus par superposition des courbes cumulatives de l'eau de pluie (P) à celles des eaux de drainage (fig. 17).

a) *Courbes P et $D_1$.*

Pendant l'année 1959, c'est-à-dire du 11 février 1959, moment où le drainage cesse pratiquement, au 14 mars 1960, moment où le drainage cesse à nouveau, la quantité de chlore de l'eau de pluie reçue par le lysimètre $D_1$ était de 5 464,07 mg, alors que la case lysimétrique avait débité 2 439,42 mg. Il y aura donc eu emmagasinement en chlore de l'eau de pluie de 5 464,07 mg — 2 439,42 mg = 3 024,65 mg.

Pendant l'année 1960, du 14 mars au 6 février 1961, la quantité en chlore de l'eau de pluie reçue par le lysimètre, avait été de 5 094,30 mg, alors que la case lysimétrique avait livré 3 004,22 mg. Il y a donc une accumulation du Cl de l'eau de pluie dans le lysimètre de :

5 094,30 mg — 3 004,22 mg = 2 090,08 mg/l.

Entre les deux périodes de cessation de drainage, 6 février 1961 et 12 avril 1962, la pluie apporte 4 162,66 mg de chlore, tandis que le drainage n'en livre que 3 647,27 mg. Il y a donc un stockage dans le sol de 515,39 mg de chlore.

Mais si nous examinons en détail cette période, nous voyons que, du 6 février 1961 au 9 septembre, il y a d'abord emmagasinement de 889,73 mg de chlore, car la pluie en apporte 1 098,29 mg et que le drainage n'en livre que 208,56 mg. Par contre, du 9 septembre 1961 au 12 avril 1962, 374,34 mg ont été prélevés dans les réserves, car l'eau de pluie n'en apporte que 3 064,37 mg contre 3 438,71 mg drainés.

b) *Courbes P et $D_2$.*

Pendant l'année 1959, entre les deux périodes de cessation de drainage, 11 février 1959 et 14 mars 1960, la courbe cumulative de chlore de l'eau de pluie est nettement au-dessus de la courbe cumulative du chlore de l'eau de drainage. La quantité en chlore d'eau de pluie reçue avait été de 5 464,07 mg et celle exportée par l'eau de drainage de 2 603,04 mg. Il y avait donc un emmagasinement du chlore de l'eau de pluie de 5 464,07 mg — 2 603,04 mg = 2 861,03 mg.

Pendant l'année 1960, entre le 14 mars 1960 et le 6 février 1961, si nous reprenons la courbe au 14 mars 1960, sans tenir compte de l'emmagasinement de l'année précédente, la courbe cumulative de P est encore au-dessus de celle de $D_2$, il y a encore emmagasinement, la quantité de chlore apportée par l'eau de pluie avait été de 5 096,30 mg. Le lysimètre avait donné 3 609,03 mg, d'où un emmagasinement de :

5 094,30 mg — 3 609,03 mg = 1 485,27 mg.

Pour 1961, du 6 février 1961 au 12 avril 1962, la quantité de chlore de l'eau de pluie reçue est de 4 162,66 mg, tandis que celle délivrée par l'eau de drainage est de 5 288,80 mg. Il y a donc eu un prélèvement de 1 126,14 mg sur les réserves de chlore du terrain. Ce déficit provient de ce que le déficit du chlore de la période du 20 octobre 1961 au 12 avril 1962 — 1 995,8 mg — est bien plus grand que l'apport précédent du 6 février 1961 au 20 octobre 1961 — 869,6 mg —, comme le montre le tableau XV.

c) *Courbes P et $D_3$.*

Du 14 mars au 18 septembre 1960, il y a accumulation de 719,60 mg de chlore de l'eau de pluie. Du 18 septembre 1960 au 6 janvier 1961, au contraire, il y a livraison de 624,19 mg du chlore emmagasiné dans le terrain, en plus de l'apport du chlore de l'eau de pluie. Du 6 janvier 1961 au 28 février 1962, il y a mise en réserve du chlore de l'eau de pluie dans la nappe. L'excédent de chlore de l'eau de pluie sur l'eau de drainage est de :

1 339,19 mg — 504,46 mg = 834,73 mg.

Ces diverses variations du bilan entre les deux périodes de cessation de drainage, 14 avril 1960 et 28 février 1961, ont amené une mise en réserve de 930,24 mg de chlore, la pluie en ayant apporté 5 153,35 mg, et la case en ayant drainé 4 223,11 mg. Pendant la période suivante, entre deux cessations de drainage, c'est-à-dire entre le 28 février 1961 et le 12 avril 1962, il y a cette fois 195,58 mg de chlore qui a été pris à la réserve, car la pluie n'en a apporté que 4 103,62 mg, alors que $D_3$ en a drainé 4 299,2 mg.

## D. — Le bilan du chlore dans les cases lysimétriques

C'est pendant la période de septembre à février que la pluie apporte la plus grande partie du chlore. **C'est donc**

**pendant l'hiver que la pluie livre la plus grande partie de son chlore.**

**Dès le début de la reprise du drainage, les eaux ont une concentration très élevée qui s'accroît rapidement pour atteindre en peu de jours son maximum,** et il y a un décalage entre les trois lysimètres. Ce sont les cases les plus profondes qui drainent le plus tard, car là le déficit total d'eau de rétention dû à l'évapo-transpiration est le plus grand, étant donné le plus grand volume de sol soumis à cette évapo-transpiration.

**Plus la période d'évapo-transpiration est longue, plus la teneur en chlore de l'eau de rétention sera élevée, comme on pouvait s'y attendre.**

### 1° *Les apports et les livraisons dans les cases lysimétriques*

Comme nous l'avons vu, les différences entre le chlore apporté par la pluie et le chlore drainé par les cases lysimétriques varient au cours d'une année à cause de la mise en réserve du chlore de l'eau de pluie pendant la période d'évapo-transpiration intense où il n'y a pas de drainage. Les cycles annuels qui se terminent au moment où les cases cessent de drainer, présentent d'une année à l'autre un déficit de chlore dans l'eau de drainage recueilli, sauf en 1962 où $D_2$ et $D_3$ livrent un excès. L'ensemble des trois années présente un déficit pour chaque case :

*Pour $D_1$ :*

| | |
|---|---|
| Du 11 février 1959 au 14 mars 1960 .... | 3 024,65 mg/m² |
| Du 14 mars 1960 au 6 février 1961 .... | 2 090,08 — |
| Du 6 février 1961 au 12 avril 1962 .... | 515,39 — |

*Pour $D_2$ :*

| | |
|---|---|
| Du 11 février 1959 au 14 mars 1960 .... | 2 861,03 mg/m² |
| Du 14 mars 1960 au 6 février 1961 .... | 1 485,27 — |
| Du 6 février 1961 au 12 avril 1962 .... | — 1 126,14 — |

*Pour $D_3$ :*

| | |
|---|---|
| Du 14 mars 1960 au 28 février 1961 .... | 930,24 mg/m² |
| Du 28 février 1961 au 12 avril 1962 .... | — 195,58 — |

Ainsi, il peut y avoir rétention du chlore de l'eau de pluie dans le terrain des cases d'une année à une autre, ou au contraire évacuation excessive.

Il en résulte que, pour avoir un bilan exact, il faudrait tabler sur un grand nombre d'années; cela rendrait négligeables les différences entre les écarts positifs et négatifs. Trois années de mesures sont insuffisantes, mais le laissent supposer. Aussi, les premiers résultats des bilans montrent-ils que le chlore drainé est inférieur au chlore apporté par la pluie.

2° *Le chlore retenu par la végétation*

Le déficit de chlore peut être attribué, au moins en partie, à la végétation; elle en absorbe une certaine quantité, prise dans les solutions des sols, qu'elle garde dans ses tissus. La végétation des cases lysimétriques avait été coupée et emportée. Par conséquent, le chlore ainsi absorbé par les plantes ne pouvait retourner dans l'eau d'infiltration.

La flore était composée des éléments suivants : *Avena elatior* L., *Alopecurus agrestis* L., *Vicia sativa* L., *Vicia hirsuta* Koch, *Trifolium incarnatum* L., *Medicago minima* Lmk, et une mousse.

Le chlore de tous ces végétaux a été dosé selon la méthode indiquée à la p. 89 (note infra-paginale).

Les résultats sont exprimés dans le tableau suivant pour la récolte de juin 1962.

| | Récolte herbe sèche (en g) | Cendres (en g) | Teneur en Cl (en g) | Cl des cendres (en p. 100) | Cl herbe sèche (en p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|
| $D_1$..... | 649 | 25,3 | 2,382 | 9,41 | 0,367 |
| $D_2$..... | 625 | 27,8 | 2,230 | 8,02 | 0,356 |
| $D_3$..... | 723 | 51,3 | 4,360 | 8,50 | 0,603 |

La récolte ayant été de 649 g d'herbe sèche pour $D_1$, de 625 g pour $D_2$ et 723 g pour $D_3$, on a ainsi écarté du retour vers l'infiltration 2 382 mg de Cl pour $D_1$, 2 230 mg pour $D_2$, 4 360 mg pour $D_3$.

On remarquera que ces teneurs en chlore sont très voisines de celles des déficits annuels du bilan du chlore précédemment établi pour les cases lysimétriques. Dès lors, nous sommes amené à attribuer ce déficit à la disparition de la végétation.

On voit ainsi la grande importance du chlore absorbé par la végétation dans le cycle. Nous y reviendrons.

### 3° *Part du chlore du terrain dans le bilan*

Dans le bilan, il faudrait tenir compte du chlore susceptible d'être absorbé et fixé d'une manière irréversible dans le sol. Cette quantité de chlore est presque nulle et même négligeable par rapport aux quantités de chlore qui entrent dans le cycle.

Il faudrait également tenir compte du chlore susceptible d'être livré par le terrain au cours des phénomènes d'altération de la roche-mère. A Talence, la roche-mère est un sable formé de grains de quartz donc dépourvu de chlorures. Il ne peut y avoir que d'infimes traces apportées. Il n'en serait pas de même dans tous les terrains.

*Conclusion.*

**Dans le cycle du chlore que nous avons étudié, n'intervient que le chlore de l'eau de pluie comme source du chlore des eaux souterraines. Par conséquent, les concentrations en chlore de l'eau de pluie et celles de l'eau de drainage permettent de calculer le coefficient d'alimentation des cases lysimétriques. De même, la concentration en chlore de l'eau de pluie et celle de l'eau des nappes alimentées directement par infiltration permettent de calculer le coefficient d'alimentation de ces nappes.**

## E. — Cycle pédologique des sels

### 1° *Le cycle du chlore, le cycle des sels*

De l'étude précédente, on conclura que le chlore des solutions des sols est ramené de la profondeur par les plantes vers la surface. On remarquera que les quantités ainsi remontées sont environ la moitié de celles apportées par la pluie. Elles retournent ensuite dans le sol après la mort et la décomposition des végétaux, entrant à nouveau dans le cycle.

Le sol continuerait à s'enrichir en chlore s'il n'en était pas chassé en partie par les eaux d'infiltration pour gagner les nappes. Si l'on admet que le régime est permanent, i.e. que la teneur moyenne en chlore reste constante, ou encore qu'il n'y a ni perte, ni enrichissement et cela pendant un très long laps de temps, portant sur des siècles ou des milliers d'années, la quantité de chlore qui gagne la nappe sera égale à celle qu'apporte la pluie.

Ce que nous venons d'indiquer pour le chlore est valable pour les autres éléments de l'eau de pluie.

Les analyses de l'eau de pluie ont donné les éléments suivants à Talence [1], en mg/l.

| | 10 octobre 1961 | 30 mai 1962 | 17 juillet 1962 |
|---|---|---|---|
| Ca | 10 | 7,20 | 4,10 |
| Mg | 0,5 | 0,48 | 0,50 |
| Na | 3 | 1 | 3,50 |
| K | 1 | 2,8 | 1,00 |
| Cl | 7 | 1,77 | 7,81 |
| $SO_4$ | 5 | 12,33 | 3,00 |
| $HCO_3$ | 24 | 15,25 | 9,15 |
| $NO_3$ | 8 | 0,16 | néant |
| $SiO_3$ | 2,4 | » | » |
| *p*H | » | » | 6,6 |

Ces eaux sont donc susceptibles d'apporter aux sols d'autres éléments que le chlore.

D'autre part, les feuilles et les végétaux en renferment aussi en proportions importantes. Nous donnons ci-après quelques analyses, en particulier celles de la végétation de Talence (tableaux p. 87 et p. 89).

Nous avons donc à élargir les notions précédentes.

Les plantes contiennent ainsi une proportion importante d'éléments minéraux. Ces substances minérales ont été soutirées dans la profondeur du sol, en particulier dans les horizons A et B et ramenées à la surface. Les feuilles et les branches mortes retombent sur le sol et donnent naissance à de l'humus. Une minéralisation des matières organiques se produit. Les substances minérales repassent ainsi en solution et descendent dans le sol où elles sont bientôt reprises par les racines. Mais les remontées et les descentes sont inégales. Ainsi, il peut y avoir accumulation vers la surface des éléments plus facilement mis en solution par les plantes que par l'eau, telle que la silice. Il y a au contraire des éléments

(1) On voit que la composition de l'eau de pluie est assez variable. Nous avons déjà insisté en ce qui concerne le chlore. Dans l'analyse du 30 mai 1962, la teneur en $SO_4$ est très élevée. Or la pluie venait du S.-S.-W. Il est possible que cette haute teneur en $SO_4$ ait son origine à Lacq.

| | Composition des cendres de végétaux (en p. 100) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cendres | K | Na | Ca | Mg | Fe | P | S | Si | Cl |
| *Légumineuses :* | | | | | | | | | | |
| Moyenne de 190 (1)..... | 7,9 | 27,0 | 3,4 | 18,0 | 3,4 | 1,0 | 4,7 | 1,7 | 5,1 | 4,1 |
| Légumineuses cultivées : | | | | | | | | | | |
| Moyenne de 50 (1)..... | 10,4 | 27,0 | 3,2 | 11,8 | 3,2 | 1,7 | 3,4 | 2,4 | 6,6 | 5,8 |
| Trèfle (2)..... | 7,7 | 22,1 | 0,4 | 17,6 | 3,8 | » | 6,3 | 0,8 | 2,5 | 2,6 |
| Pois (2)..... | 3,1 | 29,3 | 1,9 | 7,2 | 7,1 | » | 30,1 | 1,6 | 0,7 | 1,1 |
| Haricots (2)..... | 3,5 | 40,7 | 0 | 4,1 | 6,9 | » | 26,8 | 0,4 | 0,5 | 0,1 |
| Fèves (2)..... | 3,0 | 37,5 | 0 | 3,6 | 5,2 | » | 34,2 | 0,5 | 2,3 | 0,7 |
| Luzerne (3)..... | 2,45 | 6,94 | » | 23,7 | 3,35 | 0,11 | » | 4,23 | 0,38 | 2,85 |
| *Graminées :* | | | | | | | | | | |
| Moyenne de 260 (1)..... | 6,6 | 23,0 | 3,1 | 4,4 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 2,4 | 19,0 | 6,1 |
| Graminées cultivées : | | | | | | | | | | |
| Moyenne de 60 (1)..... | 7,0 | 31,8 | 1,8 | 4,8 | 2,0 | 0,4 | 3,2 | 2,6 | 15,0 | 5,5 |
| Froment (2)..... | 2,4 | 32,8 | tr | 2,1 | 9,5 | » | 47,0 | 0,3 | 0,6 | tr |
| Paille de froment (2)... | 7 | 7,6 | 0,2 | 6,1 | 3,0 | » | 3,1 | 0,3 | 31,5 | 0,6 |
| Avoine (2)..... | 4 | 10,7 | 0 | 2,6 | 4,6 | » | 14,9 | 0,3 | 24,9 | 0,5 |
| Paille d'avoine (2)..... | 5,1 | 20,3 | 3,3 | 5,9 | 1,7 | » | 3,0 | 1,4 | 18,7 | 4,7 |
| *Foins* (4) *:* | | | | | | | | $SO_4$ | | |
| *a)* 14 de prairies et d'herbes ..... | 57,2 | 12,9 | 1,4 | 8,0 | 3,1 | » | 1,7 | 4,3 | 10,5 | 9,1 |
| *b)* 17 trèfles et plantes à siliques ..... | 58,4 | 13,1 | 1,3 | 21,1 | 4,8 | » | 2,3 | 4,3 | 2,4 | 3,5 |
| *c)* 6 plantes fourragères diverses ..... | 103,4 | 11,9 | 1,7 | 18,9 | 4,1 | » | 2,0 | 5,2 | 3,5 | 4,7 |
| *Fourrages verts :* | | | | | | | | | | |
| *a)* 13 graminées et herbes ..... | 17,2 | 14,1 | 1,3 | 6,6 | 2,8 | » | 1,9 | 3,5 | 11,2 | 6,4 |
| *b)* 13 trèfles et plantes à siliques ..... | 13,3 | 13,1 | 1,1 | 22,0 | 4,8 | » | 3,9 | 3,7 | 2,5 | 3,7 |
| *c)* 6 plantes fourragères diverses ..... | 14,6 | 10,8 | 1,0 | 20,6 | 4,9 | » | 2,2 | 6,0 | 2,3 | 4,8 |
| *Divers :* | | | | | | | | | | |
| 9 plantes à racines (4). | 8,2 | 1,9 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | » | 3,1 | 0,6 | 0,8 | 0,52 |
| 10 feuilles et tiges des plantes racines (4). | 16,8 | 9,6 | 3,7 | 19,4 | 4,7 | » | 1,5 | 7,6 | 3,1 | 9,0 |
| 22 légumes (4)..... | 9,8 | 14,8 | 4,0 | 8,7 | 2,6 | » | 3,6 | 8,3 | 0,3 | 6,12 |
| *Pailles* (4) *:* | | | | | | | | | | |
| *a)* 8 céréales..... | 46,4 | 9,6 | 0,7 | 5,4 | 1,9 | » | 1,2 | 3,4 | 19,7 | 2,4 |
| *b)* 9 plantes diverses... | 43,2 | 13,3 | 1,9 | 20,9 | 4,3 | » | 1,6 | 5,2 | 2,5 | 5,8 |
| 16 plantes industrielles. | 40,5 | 13,4 | 1,7 | 19,1 | 3,7 | » | 2,2 | 4,5 | 3,4 | 4,4 |

(1) D'après V. A. Kovda (1956), *in* Perel'man (1961).
(2) Boussingault, *in* Schlœsing.
(3) D. Bertrand (1950), *in* Brian Mason (1952).
(4) Moyennes calculées à l'aide des tables de Wolff, *in* L. Grandeau (1897).

qui ne remontent pas par les plantes, tels que Fe, Al, ce qui explique leur appauvrissement dans le haut des sols. D'autres éléments, au contraire, montent facilement, tels que Ca et Na. Mais on peut dire qu'ils redescendent avec autant de facilité.

Il y a donc, ici aussi, un cycle fermé sol-végétation-sol. Il est alimenté par l'eau de pluie qui, comme pour le chlore, dérive des éléments par infiltration vers les nappes d'eau souterraines, même si l'on considère de grandes durées. En réalité, le cycle est plus complexe : une partie des éléments Ca, Mg, Na, K, $SO_4$ qui entrent dans le cycle, provient de la dissolution et de l'attaque par les acides organiques et par $CO_2$ de la partie supérieure de l'horizon C. **Donc, en régime permanent, la quantité d'éléments qui gagne les eaux souterraines doit être égale à celle qu'apporte l'eau de pluie, en y ajoutant les éléments provenant de la dissolution et de l'attaque de la partie supérieure de l'horizon C.**

$HCO_3$ a son origine dans la décomposition de la matière organique qui produit du $CO_2$. Une partie de cet $HCO_3$ provient aussi de l'attaque par le $CO_2$ des carbonates du sol. Dans le cycle de cet élément, il y a départ vers les eaux souterraines, mais aussi départ vers l'atmosphère extérieure sous forme de $CO_2$ gazeux.

### 2° *Cas de Talence*

Nous pourrons appliquer ces notions aux cases lysimétriques de Talence. La végétation joue ainsi un rôle important dans la géochimie des eaux des sols par suite du recyclage qu'elle opère. Les résultats obtenus par le chlore nous ont amené à approfondir ce point de vue et à l'étendre aux autres éléments.

Aussi, avons-nous procédé à l'analyse des plantes [1]. Nous avons coupé les parties aériennes des plantes des cases lysimétriques en juin 1962, ce qui correspond sensiblement à ce que l'on peut récolter en un an. Ces plantes comprenaient, comme nous l'avons dit plus haut : *Avena elatior* [1] L., *Vicia sativa* L., *V. hirsuta* Koch, *Trifolium incarnatum* L., *Medicago minima* Lmk et une mousse. La récolte a été de

(1) L'*Alopecurus* n'existait pas à ce moment.

649 g d'herbes sèches sur $D_1$, 625 g sur $D_2$ et 723 g sur $D_3$. Et les analyses [1] ont donné les concentrations suivantes :

| | $D_1$ (en g) | CENDRES (p. 100) | $D_2$ (en g) | CENDRES (p. 100) | $D_3$ (en g) | CENDRES (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Herbe sèche..... | 649 » | » | 625 » | » | 723 » | » |
| Cendres..... | 25,3 | » | 27,8 | » | 51,3 | » |
| Cl..... | 2,382 | 9,41 | 2,230 | 8,02 | 4,360 | 8,50 |
| $SO_4$..... | 0,451 | 1,79 | 0,372 | 1,34 | 0,399 | 0,73 |
| Na..... | 0,650 | 2,57 | 0,800 | 2,88 | 0,980 | 1,91 |
| K..... | 1,030 | 4,07 | 1,760 | 6,33 | 2,630 | 5,13 |
| Mg..... | 0,400 | 1,58 | 0,380 | 1,37 | 0,300 | 0,59 |
| Ca..... | 3,850 | 15,21 | 2,980 | 10,72 | 1,660 | 3,23 |
| Fe..... | 0,160 | 0,63 | 0,020 | 0,071 | 0,023 | 0,04 |

Tout d'abord, nous remarquerons que les concentrations en pourcentage de cendres de Ca, Mg, Fe, $SO_4$ et aussi de Cl, mais à un degré moindre, sont d'autant plus élevées que les cases sont moins profondes. Cela s'explique par le fait que, ainsi que le montrent les analyses des solutions des sols (tableaux IX, X, XI), ces solutions sont plus concentrées en ces éléments dans les cases élevées que dans les cases profondes. Ca est maximum en $D_1$ ou $D_2$, Mg est maximum en $D_2$, et $SO_4$ en $D_1$ lorsqu'il y a de hautes concentrations. Ceci est conforme au coefficient d'absorption biologique.

---

(1) La méthode d'extraction pour l'analyse des éléments a été la suivante :

Les végétaux ont été séchés à l'étuve, à la température de 75°, puis ils ont été broyés en poudre.

Pour le dosage de K, Na, Ca et Mg, on procède à un extrait chlorhydrique des cendres.

Pour le dosage du chlore, la poudre végétale a été mélangée avec une solution de 15 % de carbonate de sodium, puis a été séchée à l'étuve à 100°, puis incinérée très doucement. Les cendres ont été reprises par de l'eau chaude. La solution a été filtrée, puis neutralisée exactement par de l'acide nitrique au 1/5. Et finalement, le chlore a été dosé par la méthode de Mohr.

Pour le dosage du soufre total, la poudre végétale a été mise en contact pendant une heure avec une quantité suffisante d'alcool éthylique saturé de nitrate de magnésium. On chauffe ensuite progressivement sur plaque jusqu'à ce que la réaction soit complète. On calcine à 450° pendant une heure. Puis les cendres sont reprises par un excès d'acide chlorhydrique.

Dans ce qui suivra, nous ne tiendrons compte que de la végétation de $D_3$, car les faibles profondeurs de $D_2$ et de $D_1$ ont amené des conditions anormales de circulation et d'évapotranspiration de l'eau, et par conséquent de concentration.

Tout d'abord, nous calculerons la composition moyenne de l'eau de pluie (moyenne des trois analyses), puis la composition moyenne de l'eau de $D_3$ en période de crue, à l'aide des analyses du 30 décembre 1960, du 28 février 1961 et du 3 mars 1962, et en période d'étiage, analyse du 10 novembre 1961. Enfin, nous déterminerons la composition moyenne de l'eau de la nappe, à l'aide des analyses du 20 mars 1961, du 8 août 1961 et du 23 mars 1962, de l'eau du puits de la Préhistoire.

Ensuite, nous calculerons en A la quantité d'éléments apportés par la pluie sur 1 $m^2$ en 1961, en multipliant la composition moyenne de la pluie par la hauteur de pluie de 1961.

Nous calculerons en B la quantité d'éléments drainés par $D_3$ en 1961, en admettant que sur les 330 litres d'eau drainés, 304 l'ont été en période de crue et 26 en période de libération. (On a donc multiplié la composition de la crue par 304, et celle de la libération par 26.)

Cette quantité d'éléments drainés par $D_3$ correspond à une condition anormale, car pendant trois années successives, la couverture végétale avait été fauchée, emmenant avec elle des éléments chimiques ainsi mis hors de circuit. Aussi, avons-nous calculé en C la quantité d'éléments reçus par la nappe, en utilisant pour cela le puits de la Préhistoire. Nous avons admis que le Cl apporté par la pluie est passé en totalité dans la nappe. Ce n'est évidemment qu'une approximation, mais qui serre d'assez près le problème. On a donc multiplié tous les éléments de la composition moyenne de la nappe par le rapport $\frac{Cl\,p}{Cl\,n} \times P = \frac{5,5}{29} \times 1\,288 = 244,2.$

D est la quantité fixée par la végétation en 1961 sur $D_3$.
E est la différence C - A.
F est la différence B - A.
G est la différence C - B.

Ces résultats, exposés dans le tableau de la p. 91, nous montrent que l'apport par la pluie est une fraction très importante de ce que la nappe peut recevoir. C'est ce qui ressort de la comparaison de l'apport annuel par la pluie (A)

| | Ca | Mg | Na | K | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Composition moyenne de la pluie (en mg/l)..... | 7,1 | 0,5 | 2,5 | 1,6 | 5,5 | 6,8 | 16,1 |
| Composition moyenne de l'eau de $D_3$ (en mg/l) : | | | | | | | |
| Crue ..... | 68,0 | 4,1 | 5,9 | 1,7 | 5,3 | 6,2 | 220,0 |
| Débâcle ..... | 143,0 | 6,5 | 9,0 | 5,0 | 86,0 | 80,0 | 161,0 |
| Composition moyenne de la nappe (en mg/l) : 23-3-62, 20-3-61, 8-8-61. | 115,0 | 5,5 | 18,0 | 10,0 | 29,0 | 42,0 | 333,0 |
| A. - Apport annuel par la pluie (1 288 mm) (en mg/l) ..... | 9 160 | 645 | 3 220 | 2 060 | 7 090 | 8 760 | 20 750 |
| B. - Drainage $D_3$ (en mg) : | | | | | | (5 160) | |
| Crue ..... 304 mm | 20 500 | 1 240 | 1 780 | 513 | 1 611 | 1 870 | 66 400 |
| Débâcle .... 26 — | 3 720 | 169 | 234 | 130 | 2 236 | 2 080 | 4 186 |
| Année ..... 330 mm | 24 220 | 1 409 | 2 014 | 643 | 3 847 | 3 950 | 70 586 |
| C. - Reçu par la nappe (calculé avec Cl n = Cl p) (1).. | 28 100 | 1 345 | 4 400 | 2 440 | 7 090 | 10 260 | 81 200 |
| D. - Fixé par la végétation en $D_3$ (en mg) ..... | 1 660 | 300 | 980 | 2 630 | 4 360 | 399 | » |
| E. - Nappe-pluie (2) (en mg) | 18 940 | 700 | 1 180 | 380 | 0 | 1 500 | 60 450 |
| | | | | | | (5 100) | |
| F. - Drainage $D_3$ - Pluie (3) | 15 060 | 764 | — 1 106 | — 1 417 | — 3 243 | —(1110) | » |
| G. - C — B = retenue par la végétation de $D_3$... | 3 880 | — 64 | 2 386 | 1 797 | 3 243 | 6 310 | » |

(1) On a multiplié les éléments de la composition de la nappe par 5,5 × 1 288/29.
(2) Quantité reçue par la nappe — la quantité reçue par la pluie = substances dissoutes dans le terrain.
(3) Quantité drainée par $D_3$ — la quantité reçue par la pluie = substances dissoutes — substances retenues par la végétation.

et de la quantité reçue par la nappe (C). Voir les rapports A/C (tableau de la p. 92) : 0,33 du calcium, 0,48 du magnésium, 0,73 du sodium sont apportés par la pluie. La comparaison que l'on pourrait faire entre l'apport de la pluie (A) et le drainage de $D_3$ (B) serait faussée par le fait que la végétation de $D_3$ a été coupée.

La part d'éléments (D) que la végétation peut fixer n'est pas à négliger si l'on compare cette part à l'apport par la pluie où à la quantité reçue par la nappe. Voir les rapports D/A et D/C du tableau ci-dessous. On remarquera que la fixation est surtout importante pour le chlore où elle atteint 0,61, et pour le potassium où elle dépasse 1.

Ces calculs permettent encore d'apprécier les quantités de substances qui ont été dissoutes dans le terrain par l'eau d'infiltration. Elles sont données en E par la différence C - A, entre la quantité arrivant à la nappe et la quantité apportée par l'eau de pluie. On constate alors que les substances dissoutes sont essentiellement Ca et $HCO_3$, et, à un degré moindre, Na et $SO_4$. $HCO_3$ provient en réalité de la décomposition des matières organiques dans le sol et à un degré bien moindre des carbonates du sol.

Le rapport E/C indique la proportion de ces substances dissoutes dans l'eau de la nappe. Il est de 0,74 pour $HCO_3$, de plus de 0,50 pour Ca, Mg et $SO_4$; de 0,27 pour Na et seulement de 0,16 pour K.

| | Ca | Mg | Na | K | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A/C.... | 0,33 | 0,48 | 0,73 | 0,84 | 1 | (0,50) | 0,26 |
| D/A.... | 0,18 | 0,46 | 0,30 | 1,28 | 0,61 | 0,08 | » |
| D/C.... | 0,06 | 0,22 | 0,22 | 1,08 | 0,61 | 0,04 | » |
| E/C..... | 0,67 | 0,52 | 0,27 | 0,16 | 0 | 0,50 | 0,74 |
| E/A..... | 2,07 | 1,09 | 0,37 | 0,18 | 0 | 0,99 | 2,91 |

La différence G = C — B entre ce que reçoit la nappe et ce que draine $D_3$ peut être en grande partie rapportée à ce qui a été retenu par la végétation.

Les chiffres sont du même ordre de grandeur pour la rétention par la végétation de $D_3$ en 1961. Il y a certes des divergences qui peuvent être dues à ce que la végétation de la case $D_3$ ne correspond qu'à une végétation locale, non représentative de la couverture végétale générale, constituée non seulement par l'herbe de $D_3$, mais aussi par des arbres : *Syringua vulgaris* L., *Carpinus betulus* L., *Quercus pedunculata* Ehrbg., *Celtis australis* L., *Laurus nobilis* L., *Evonymus europaeus* L., *Magnolia*...

Néanmoins, la concordance est suffisante pour être significative.

Enfin, la différence F = B — A, entre la quantité drainée par $D_3$ et l'apport par la pluie donne en principe les substances dissoutes dans $D_3$, diminuées des substances retenues par la végétation. Là où les valeurs sont positives, la dissolution prédomine sur la rétention. Là où les valeurs sont négatives, c'est au contraire la rétention qui prédomine. On voit ainsi que Ca et Mg ont été dissous en quantités plus grandes que celles demandées par les plantes, tandis que le terrain s'est appauvri en Na. K, Cl et $SO_4$, appauvrissement provoqué par les coupes annuelles successives de la végétation.

### 3° *Cas de Versailles*

L'importance de la fixation des éléments par les plantes vis-à-vis des mises en solution se rapportant aux nappes d'eau souterraines peut encore se déduire du tableau suivant (p. 94) des exportations moyennes annuelles des éléments chimiques en kg par hectare (si l'on veut, en g par 10 m² de surface) des cases lysimétriques de Versailles (Bastisse 1951). Rappelons que ces cases lysimétriques n'ont que 60 cm de profondeur et que, de ce fait, l'équilibre dynamique n'est pas tout à fait égal à celui qui correspond aux nappes, comme nous l'avons fait remarquer pour les cases lysimétriques de Talence.

Néanmoins, on voit que la partie fixée par la récolte est très importante. C'est une fraction notable de ce qui est mis en solution dans la case nue et même de ce qui est mis en solution dans la case cultivée.

On remarquera que, du fait de cette fixation, les eaux de drainage des cases cultivées exportent vers la nappe une quantité moins grande de substances chimiques.

### 4° *Apports des éléments du sol et des éléments de la pluie dans les eaux de drainage*

En faisant un rapport entre les éléments de l'eau de drainage et les éléments de l'eau de pluie, on peut se rendre compte de ce qui a été dissous dans le terrain. Nous admettrons que la dissolution du Cl dans le terrain est négligeable. En effet, ce terrain est un sable formé de grains de quartz difficilement attaquable et ne contenant pratiquement pas de chlore. De plus, il n'a pu y avoir d'accumulation de chlore à long terme dans le sol en raison de l'intense lessivage provo-

EXPORTATIONS MOYENNES ANNUELLES DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES en kg par hectare (soit en g pour 10 m²), BASTISSE (1951).

| | | CASE NUE DRAINAGE A | CASE CULTIVÉE DRAINAGE | CASE CULTIVÉE RÉCOLTE | CASE CULTIVÉE TOTAL B | DIFFÉRENCE A - B |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ensemble des groupes 1 et 2 1933-1936. Début de l'expérience et période intermédiaire. Culture de plantes non légumineuses. | $K_2O$..... | 10,7 | 7,0 | 81,8 | 88,8 | — 78,1 |
| | $P_2O_5$.... | 0,33 | 0,25 | 30,13 | 30,38 | — 30,05 |
| | MgO.... | 50,0 | 34,6 | 10,9 | 45,5 | + 4,5 |
| | CaO..... | 524,7 | 386,3 | 26,2 | 412,5 | + 112,2 |
| | $SO_3$..... | 230,5 | 178,7 | 22,8 | 201,5 | + 29,0 |
| | $N_2O_5$.... | 635,6 | 336,8 | 214,1 | 550,9 | + 84,7 |
| Groupe 4, 1942-1949. Période normale. Culture de plantes non légumineuses. | $K_2O$..... | 6,2 | 2,7 | 50,7 | 53,4 | — 47,2 |
| | $P_2O_5$.... | 0,26 | 0,14 | 21,49 | 21,63 | — 21,37 |
| | MgO.... | 18,3 | 9,2 | 13,0 | 22,2 | — 3,9 |
| | CaO..... | 334,9 | 162,7 | 28,6 | 191,3 | + 143,6 |
| | $SO_3$..... | 123,1 | 88,1 | 27,1 | 115,2 | + 7,9 |
| | $N_2O_5$.... | 353,1 | 102,2 | 151,0 | 253,2 | + 99,9 |
| Groupe 3, 1937-1940. Période normale. Culture de plantes légumineuses. Effet luzerne. | $K_2O$..... | 7,6 | 3,0 | 113,8 | 116,8 | — 109,2 |
| | $P_2O_5$.... | 0,30 | 0,14 | 28,0 | 28,14 | — 27,84 |
| | MgO.... | 25,1 | 16,6 | 26,8 | 43,4 | — 18,3 |
| | CaO..... | 432,7 | 292,8 | 146,9 | 439,7 | — 7,0 |
| | $SO_3$..... | 179,7 | 160,2 | 44,2 | 204,4 | — 24,7 |
| | $N_2O_5$.... | 450,4 | 156,1 | 668,6 | 824,7 | — 374,3 |

Récolte moyenne de matière végétale (en g/m²) :

Groupes 1 et 2 : 769 + 380 + 551 + 433 + 1 044 ..... moyenne 635

Groupe 4 : 974 + 270 + 560 + 432 + 517 + 885 + 453 + 470 — 569

Groupe 3 : 314 + 734 + 900 + 382 ..... — 582

qué par les pluies annuelles abondantes. Par conséquent, nous poserons Cl eau de drainage/Cl eau de pluie = 1. Comme la teneur en éléments de l'eau de pluie est assez variable, nous dresserons les rapports en utilisant la pluie du 10 octobre 1961 et celle du 30 mai 1962. Ces rapports sont indiqués dans les deux tableaux suivants (pp. 95 et 96).

L'égalité que nous posons Σ Cl eau de drainage = Σ Cl eau de pluie, établie sur une longue période, multi-annuelle, est justifiée par le fait que la quantité de Cl dissoute dans le terrain est négligeable, comme nous l'avons établi. D'ailleurs,

Law, Gilbert et Warrington (1881-1882) font remarquer dans leurs observations sur les cases lysimétriques de Rothamsted, que la quantité de chlore drainée par les cases lysimétriques nues est à peu près la même que celle qui a été apportée par la pluie, ainsi que cela ressort du tableau suivant :

Livres de chlore par acre et par an, apportées par la pluie et drainées par les cases lysimétriques nues, de 20, 40, 60 inches de profondeur.

| | Pluies | | Lysimètres | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Inches | Livres Cl | 20 inches | 40 inches | 60 inches |
| 1879..... | 36,038 | 14,51 | 15,26 | 15,58 | 14,64 |
| 1880..... | 33,966 | 14,30 | 14,85 | 15,54 | 13,77 |

Apport par le terrain moins apport par la pluie.

Rapport des éléments par rapport à ceux de la pluie du 10 octobre 1961, pour des teneurs en Cl égales.

| | Ca | Mg | Na + K | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Décembre 1960 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 5,30 | 5,7 | 2,1 | 1 | 1,47 | 7,2 |
| $D_2$ ..... | 14,1 | 24,0 | 3,9 | 1 | 2,9 | 19,5 |
| $D_3$ ..... | 25,9 | 44,1 | 10,5 | 1 | 8,5 | 37,0 |
| Février 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 4,5 | 3,9 | 0,7 | 1 | 0,14 | 5,4 |
| $D_3$ ..... | 6,7 | 4,1 | 1,3 | 1 | 0,18 | 8,3 |
| Juillet 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 2,4 | 2,0 | 0,7 | 1 | 2,1 | 2,4 |
| Novembre 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 1,9 | 1,2 | 0,4 | 1 | 1,17 | 0,18 |
| $D_2$ ..... | 1,9 | 2,5 | 0,3 | 1 | 1,3 | 0,4 |
| $D_3$ ..... | 1,2 | 1,1 | 0,3 | 1 | 1,4 | 0,5 |
| Mars 1962 : | | | Na | | | |
| $D_1$ ..... | 8 | 7,3 | 1,3 | 1 | 1,4 | 10 |
| $D_2$ ..... | 13,3 | 11,3 | 1,8 | 1 | 0,4 | 17 |
| | | | Na + K | | | |
| $D_3$ ..... | 7,5 | 11,8 | 2,1 | 1 | 2,1 | 10,3 |

APPORT PAR LE TERRAIN MOINS APPORT PAR LA PLUIE.

Rapport des éléments par rapport à ceux de la pluie du 30 mai 1962, pour des teneurs en Cl égales.

| | Ca | Mg | Na + K | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Décembre 1960 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 1,8 | 1,4 | 0,7 | 1 | 0,13 | 2,9 |
| $D_2$ ..... | 4,9 | 6,0 | 1,3 | 1 | 0,3 | 7,8 |
| $D_3$ ..... | 9,0 | 11,1 | 3,4 | 1 | 0,8 | 14,8 |
| Février 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 1,6 | 0,9 ∽ 1 | 0,2 | 1 | 0,08 | 2,2 |
| $D_3$ ..... | 2,3 | 1,5 | 0,4 | 1 | 0,02 | 2,6 |
| Juillet 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 1 | 0,2 | 0,9 |
| Novembre 1961 : | | | | | | |
| $D_1$ ..... | 0,7 | 0,3 | 0,13 | 1 | 0,11 | 0,07 |
| $D_2$ ..... | 0,7 | 0,6 | 0,106 | 1 | 0,12 | 0,15 |
| $D_3$ ..... | 0,4 | 0,3 | 0,09 | 1 | 0,13 | 0,2 |
| Mars 1962 : | | | Na | | | |
| $D_1$ ..... | 2,8 | 1,8 | ∽ 1 | 1 | 0,14 | 4,0 |
| $D_2$ ..... | 4,6 | 2,8 | 1,4 | 1 | 0,04 | 6,8 |
| $D_3$ ..... | 2,6 | 2,9 | 0,7 | 1 | 0,2 | 4,1 |

Les conclusions que l'on peut tirer de ces tableaux sont les suivantes :

*Pendant la période de lessivage,* il y a un apport beaucoup plus grand de calcium et de magnésium que de sodium par le terrain. Celui des sulfates, comparativement à celui du calcium et du magnésium, est relativement faible. L'apport en bicarbonates est grand. Celui de calcium, de magnésium et de sodium par le terrain augmente vers la profondeur.

Cela est dû à l'action du lessivage. Les quelques inversions qui se produisent peuvent être rapportées à des modifications dues à des échanges de bases. Les sulfates augmentent aussi vers la profondeur, mais proportionnellement moins que ne le fait le calcium; cette augmentation est irrégulière.

$HCO_3$ est très grand, car c'est essentiellement un apport du sol. Il présente une tendance très nette d'augmentation vers la profondeur.

*Pendant la période d'évapo-transpiration,* l'apport du calcium et du magnésium par le terrain est beaucoup plus faible; leur augmentation est limitée par la tension du gaz carbonique de l'atmosphère du sol. $HCO_3$, de ce fait, tend à rester constant en valeur absolue, d'où sa diminution très nette en valeur relative par rapport au Cl. L'apport du calcium et du magnésium se fait surtout en relation avec les sulfates. Il y a une diminution très nette en sodium. C'est en relation avec un échange de bases qui fixe du sodium pendant cette période, comme nous l'avons déjà indiqué par ailleurs.

Pendant la période de lessivage, les éléments sont pris proportionnellement en plus grande quantité au sol.

## F. — Calcul du coefficient d'alimentation

Le calcul du coefficient d'alimentation des cases lysimétriques peut se faire par la mesure de la quantité de pluie tombant sur les cases et la mesure de la quantité d'eau drainée par ces cases pendant le même temps, c'est-à-dire durant un même cycle hydrologique.

Mais nous pensons que ce même calcul peut se faire à l'aide du bilan du chlore.

Nous suivrons ces deux méthodes.

### 1° *Drainage, évapo-transpiration et coefficient d'alimentation calculés à l'aide des mesures de drainage*

Les coefficients d'alimentation ont tout d'abord été calculés à l'aide des relevés pluviométriques et des relevés des quantités d'eau drainées par les cases lysimétriques. Il n'y a évidemment aucune eau de ruissellement. Tous les relevés journaliers et tous les relevés cumulés aussi bien de la pluie que des eaux de drainage de $D_1$, $D_2$, $D_3$ ont été portés sur des graphiques. Nous ne pouvons les donner ici tous; ils sont conservés dans les Archives du Centre Hydrogéologie-Géochimie. Pour chacune des années 1959, 1960, 1961 et 1962, nous avons établi les bilans :

1° Pour les périodes d'été, pendant lesquelles l'évapo-transpiration prédomine sur l'infiltration;

2° Pour les périodes d'hiver, pendant lesquelles l'infiltration, au contraire, prédomine sur l'évapo-transpiration;

3° Pour les cycles annuels.

Ces bilans sont exposés dans les tableaux suivants :

COEFFICIENT D'ALIMENTATION (année 1959-1960)

| | P (mm) | $D_1$ (mm) | $D_2$ (mm) | $D_3$ (mm) | $D_1/P$ ou $E_1/P$ (p. 100) | $D_2/P$ ou $E_2/P$ (p. 100) | $D_3/P$ ou $E_3/P$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 1er-1-1959 au 1er-5-1959.. | 236,60 | 80,35 | 90,32 | » | 33,8 | 38 | » |
| E = P — D.... | » | 156,25 | 146,28 | » | 66,4 | 62 | » |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 2-5-1959 au 3-8-1959... | 190,9 | 37,85 | 10,40 | » | 19,9 | 5,45 | » |
| E = P — D.... | » | 153,05 | 180,5 | » | 80,1 | 94,55 | » |
| 2- 5-1959 au 9-10-1959.. | 335,3 | 55,88 | 10,40 | » | 16,7 | 3,1 | » |
| E = P — D.... | » | 319,42 | 324,9 | » | 83,3 | 96,9 | » |
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 30-8-1959 au 5-8-1960.. | 943,9 | 402,5 | 510,1 | 349,9 | 42,7 | 53,9 | 43,7 |
| E = P — D.... | » | 541,4 | 473,8 | 594,0 | 57,3 | 46,1 | 56,3 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 9-10-1959 au 28- 3-1960. | 608,2 | 349,71 | 444,90 | 342,57 | 57,5 | 73,4 | 65,9 |
| E = P — D.... | » | 259,49 | 153,3 | 255,63 | 42,5 | 26,6 | 34 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 28-3-1960 au 17-9-1960.. | 341,8 | 65,40 | 10,92 | 7,36 | 19,1 | 3,2 | 2,92 |
| E = P — D.... | » | 276,4 | 330,88 | 333,44 | 80,9 | 96,8 | 97,08 |

Coefficient d'alimentation (année 1961)

| | P (mm) | $D_1$ (mm) | $D_2$ (mm) | $D_3$ (mm) | $D_1/P$ ou $E_1/P$ (p. 100) | $D_2/P$ ou $E_2/P$ (p. 100) | $D_3/P$ ou $E_3/P$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 5- 8-1960 au 29-10-1961. | 1288 | 623,5 | 722,7 | 550,0 | 48,4 | 56,1 | 42,7 |
| E = P — D.... | » | 664,4 | 565,3 | 738,0 | 51,5 | 44,0 | 57,4 |
| 5- 8-1960 au 10-11-1961. | 1353,3 | 644,1 | 758,8 | 565,7 | 47,5 | 56,0 | 41,7 |
| E = P — D.... | » | 709,2 | 594,5 | 787,6 | 52,2 | 43,9 | 57,6 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 7-9-1960 au 6-2-1961... | 823,8 | 517,3 | 679,1 | 535,1 | 62,9 | 82,5 | 65,0 |
| E = P — D.... | » | 306,5 | 144,7 | 288,7 | 37,2 | 17,6 | 35,2 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 6- 2-1961 au 29-10-1961. | 311,7 | 61,4 | 37,8 | 14,4 | 19,4 | 12,1 | 4,6 |
| E = P — D.... | » | 250,3 | 273,9 | 297,3 | 81 | 87,9 | 95 |
| 6- 2-1961 au 10-11-1961. | 377,0 | 93,3 | 73,9 | 30,6 | 24,7 | 19,6 | 8,1 |
| E = P — D.... | » | 283,7 | 303,1 | 346,4 | 75,4 | 80,5 | 91,9 |

Coefficient d'alimentation (année 1962)

| | P (mm) | $D_1$ (mm) | $D_2$ (mm) | $D_3$ (mm) | $D_1/P$ ou $E_1/P$ (p. 100) | $D_2/P$ ou $E_2/P$ (p. 100) | $D_3/P$ ou $E_3/P$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 29-10-1961 au 5-11-1962. | 693,7 | 325,6 | 391,8 | 366,5 | 47,0 | 56,5 | 53,0 |
| E = P — D.... | » | 368,1 | 301,9 | 327,2 | 53,0 | 43,5 | 47,0 |
| 29-10-1961 au 13-10-1962. | 671,7 | 322,3 | 387,7 | 366,5 | 48,0 | 57,5 | 54,5 |
| E = P — D.... | » | 349,4 | 284,0 | 305,2 | 52,0 | 42,5 | 45,5 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 29-10-1961 au 12- 4-1962. | 511,8 | 294,2 | 387,2 | 365,5 | 57,4 | 75,0 | 71,0 |
| E = P — D.... | » | 217,6 | 124,6 | 146,3 | 42,5 | 24,6 | 29,0 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 12- 4-1962 au 13-10-1962. | 159,9 | 21,4 | 1,5 | 15,0 | 13,5 | 0,9 | 9,4 |
| E = P — D.... | » | 138,4 | 158,4 | 144,9 | 86,5 | 99,1 | 90,6 |
| 12- 4-1962 au 5-11-1962. | 186,6 | 31,7 | 5,6 | 15,0 | 17,0 | 3,0 | 8,1 |
| E = P — D... | » | 154,9 | 181,0 | 171,0 | 83,0 | 97,0 | 92,0 |

*Drainage et coefficient d'alimentation.* — Pendant les période d'été, le coefficient d'alimentation est toujours extrêmement faible par suite de l'intensité de l'évapo-transpiration (du 2 mai au 9 octobre 1959, du 28 mars au 17 septembre 1960, du 6 février au 10 novembre 1961, du 12 avril au 5 novembre 1962).

La période d'évapo-transpiration a commencé particulièrement tôt en 1961, en raison de la faible hauteur de pluie à la fin de l'hiver et au début du printemps. Le drainage cesse même complètement :

En 1959, du 2 mai au 1er septembre en $D_1$, du 11 mai au 1er septembre en $D_2$, du 2 mai au 13 octobre en $D_3$;

En 1960, du 12 avril au 17 septembre en $D_1$, du 12 avril au 17 septembre en $D_2$, du 12 avril au 19 septembre en $D_3$;

En 1961, du 6 février au 10 octobre en $D_1$, du 6 février au 20 octobre en $D_2$, du 28 février au 10 novembre en $D_3$;

En 1962, du 12 avril au 3 octobre en $D_1$, du 12 avril au 5 novembre en $D_2$, du 12 avril au 20 novembre en $D_3$.

Pendant la période d'hiver, au contraire, le drainage est important avec des coefficients d'alimentation élevés pouvant dépasser 60 et même 70 % de la hauteur de pluie.

Il est à remarquer que lorsque la hauteur de pluie est très faible à la fin de cette période, comme en 1959, entre le 9 février et le 6 avril, le coefficient d'alimentation peut s'abaisser fortement et descendre à 11,9 et même 6 % de la hauteur de pluie, car l'évapo-transpiration joue quand même.

Pendant l'année, les coefficients d'alimentation ont été, en % :

| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| du 30 août 1959 au 5 août 1960 ..... | 42,7 | 53,9 | 43,7 |
| du 5 août 1960 au 29 octobre 1961 .. | 48,4 | 56,1 | 42,7 |
| du 29 octobre 1961 au 5 nov. 1962. | 47,0 | 56,5 | 53,0 |

Les valeurs restent assez proches les unes des autres pour une même case lysimétrique. Il y a une légère augmentation pour $D_1$ et $D_2$, et une légère diminution pour $D_3$.

*L'évapo-transpiration.* — L'évapo-transpiration annuelle a été, en mm :

| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|
| du 30 août 1959 au 5 août 1960 .... | 541,4 | 473,2 | 594,0 |
| du 5 août 1960 au 29 octobre 1961 .. | 664,4 | 565,3 | 738,0 |
| du 29 octobre 1961 au 5 nov. 1962.. | 368,1 | 301,9 | 327,2 |

Elle a donc été plus grande en 1961 qu'en 1960, ce qui s'explique par la hauteur de pluie plus forte en 1961 (1 288 mm) qu'en 1960 (943,9 mm). Les plantes ont eu moins à souffrir de la sécheresse et ont pu utiliser une plus grande quantité d'eau.

*Valeurs selon les différentes cases lysimétriques.* — Si nous voulons extrapoler aux nappes d'eau souterraines les résultats de l'infiltration, de l'évapo-transpiration, du coefficient d'alimentation, seules les valeurs de la case lysimétrique $D_3$ doivent être prises en considération. En effet, dans le bas de ce lysimètre, le terrain, avec toute son eau de rétention et parfois de saturation, est bien au-dessous du niveau inférieur des racines. Nous avons ainsi les conditions naturelles dans lesquelles ont lieu l'évapo-transpiration et l'infiltration. En $D_1$, les valeurs de l'évapo-transpiration sont faussées par le fait que la tôle du fond n'est qu'à 0,15 m de profondeur. Le sol est plus rapidement asséché et la végétation se flétrit beaucoup plus rapidement. Si une forte pluie a lieu pendant la période d'évapo-transpiration, l'eau infiltrée ne pouvant descendre, est très rapidement reprise par évapo-transpiration; pendant la période d'hiver, le drainage a lieu immédiatement et la crue est trop rapide par rapport aux eaux des nappes. Il en est de même, mais d'une manière moins accentuée, pour $D_2$.

### 2° *Coefficient d'alimentation calculé d'après le chlore*

Cette méthode est basée sur les considérations suivantes : la quantité de chlore drainée par les cases lysimétriques $D \times Cl\,n$ est égale à la quantité de chlore apportée par la pluie $P \times Cl\,p$ plus la quantité de chlore dissoute dans le terrain, r, moins la quantité de chlore absorbée par la végétation, $-r\,v$, plus la quantité de chlore restituée au terrain par la végétation $+r\,v'$.

On a donc :

$$D \times Cl\,n = P \times Cl\,p + r - r\,v + r\,v'.$$

Dans le cas des sables des Landes, r est négligeable. Le coefficient d'alimentation $A = D/P$ est donc :

$$A = \frac{P \times Cl\,p - r\,v + r\,v'}{P \times Cl\,n}.$$

Lorsque la végétation n'est pas coupée, la quantité $r\,v'$ retourne dans le sol après la décomposition des végétaux.

De ce fait, $-rv + rv'$ s'annule et l'équation précédente se simplifie encore :

$$A = \frac{Cl\,p}{Cl\,n}.$$

Ce sont ces deux dernières formules que nous pouvons utiliser dans le cas de nos cases lysimétriques.

Les deux tableaux suivants (pp. 103 et 105) résument les données concernant les apports du chlore par la pluie Cl p, les quantités de chlore drainées par chacune des cases lysimétriques Cl $D_1$, Cl $D_2$, Cl $D_3$ et les rapports de chacune de ces quantités à l'apport par l'eau de pluie.

Si tout le chlore apporté par la pluie gagnait le fond des lysimètres, on devrait avoir un rapport :

$$\frac{\Sigma\,Cl\,p}{\Sigma\,Cl_D} = \frac{P \times Cl\,p}{D \times Cl_D} = 100\ \%.$$

Tous ces rapports sont nettement déficitaires, sauf pour la case $D_2$ en 1960-1961. Ce déficit est essentiellement dû au fait que la végétation avait été coupée et exportée, de telle sorte que le chlore, qui avait été fixé par elle, n'a pu retourner dans l'eau d'infiltration. Or, ce chlore retenu est notable. En 1962, il était de 2 382 mg en $D_1$, 2 230 mg en $D_2$ et 4 360 mg en $D_3$.

Pour obtenir des valeurs de 100 %, on voit qu'il faudrait retrancher ou ajouter les valeurs indiquées sous le terme de déficit ou excès dans les deux tableaux. **On constatera que ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles du chlore retenu par la végétation. Par conséquent, puisque le cycle du chlore se ferme bien, les formules du calcul du coefficient d'alimentation sont valables.**

Il y a certes des différences facilement explicables. Nous avions comparé les déficits en chlore des cases de 1959-1960, 1960-1961, à la rétention par la végétation. Or, cette rétention n'est pas la même d'une année à une autre

De plus, pendant un cycle, il peut y avoir mise en réserve du chlore de l'eau de pluie, ou au contraire libération d'une partie de la réserve. Ce rôle ne peut mieux être mis en évidence que par l'examen des lignes déficit ou excès en Cl des deux tableaux. Pour faire le bilan exact, et par conséquent pour calculer avec précision le coefficient d'alimentation avec le chlore, il est nécessaire d'opérer sur un laps de temps assez long, plusieurs années.

**L'application des formules aux nappes d'eau souterraines ne nécessite pas un temps aussi long, car toutes les inégalités et variations du bilan du chlore dans les cases lysimétriques s'amortissent en profondeur.**

CHLORE REÇU (Clp) ET CHLORE DÉBITÉ ($Cl\,D_1$, $Cl\,D_2$, $Cl\,D_3$) PAR M² ET RAPPORTS DES CHLORES DÉBITÉS ET REÇUS

(Année 1959-1960)

| | $\Sigma$ Clp (en mg) | $\Sigma$ $Cl\,D_1$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\,D_2$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\,D_3$ (en mg) | $\frac{Cl\,D_1}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\,D_2}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\,D_3}{Clp}$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 1er-1-1959 au 1er-5-1959 .. | 1238,28 | 354,43 | 856,17 | » | 28,6 | 69,4 | » |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 883,85 | — 382,11 | » | — 72,4 | — 30,6 | » |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 2-5-1959 au 3-8-1959.... | 428,35 | 545 | 200 | » | 121,4 | 46,0 | » |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | 116,65 | — 228,35 | » | + 27,2 | — 53 | » |
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 30-8-1959 au 5-8-1960... | 4521,24 | 3055 | 2430 | 2114 | 68,2 | 53,6 | 46,6 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 1436 | — 2091 | — 2407 | — 31,8 | — 46,4 | — 53,4 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 9-10-1959 au 23- 3-1960.. | 4031,93 | 1738 | 2350 | 2086 | 43,2 | 58,4 | 52,0 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 2293,93 | — 1681,93 | — 1945,93 | — 56,8 | — 41,6 | — 48 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 28-3-1960 au 17-9-1960... | 583,87 | 1360 | 2 | 2 | 230,2 | 0,34 | 0,34 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | + 776,13 | — 581,87 | — 581,87 | + 130,2 | — 99,66 | — 99,66 |

Chlore reçu (Clp) et chlore débité ($Cl\ D_1$, $Cl\ D_2$, $Cl\ D_3$) par $M^2$ et rapports des chlores débités et reçus

(Année 1961)

| | $\Sigma$ Clp (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_1$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_2$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_3$ (en mg) | $\frac{Cl\ D_1}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\ D_2}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\ D_3}{Clp}$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 5- 8-1960 au 29-10-1961.. | 6228,4 | 4477 | 7212 | 4584 | 72 | 115,8 | 73,5 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 1751 | + 984 | — 1644 | — 28,1 | + 15,8 | — 26,4 |
| 5- 8-1960 au 10-11-1961.. | 6382 | 4477 | 7986 | 6277 | 70 | 125 | 98,4 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 1905 | + 1604 | — 105 | — 29,9 | + 25,1 | — 1,6 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 6- 2-1961 au 29-10-1961.. | 1475 | 2685 | 3604 | 139 | 182 | 244 | 9,45 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | + 1210 | + 2129 | — 1336 | + 82 | + 144 | — 90,55 |
| 6- 2-1961 au 10-11-1961.. | 1629 | 2685 | 4378 | 1832 | 164 | 268 | 112 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | + 1056 | + 2749 | + 203 | + 64,8 | + 168 | + 12,5 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 17-9-1960 au 6-2-1961... | 4461 | 1642 | 3606 | 4079 | 36,7 | 81 | 91,3 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 2819 | — 855 | — 382 | — 63,2 | 19,2 | — 8,7 |

CHLORE REÇU (Clp) ET CHLORE DÉBITÉ ($Cl\ D_1$, $Cl\ D_2$, $Cl\ D_3$) PAR $M^2$ ET RAPPORTS DES CHLORES DÉBITÉS ET REÇUS

(Année 1962)

| | $\Sigma$ Clp (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_1$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_2$ (en mg) | $\Sigma$ $Cl\ D_3$ (en mg) | $\frac{Cl\ D_1}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\ D_2}{Clp}$ (p. 100) | $\frac{Cl\ D_3}{Clp}$ (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cycle annuel :* | | | | | | | |
| 29-10-1961 au 5-11-1962.. | 4655,7 | 2216,6 | 1257,6 | 4305,6 | 47,6 | 26,9 | 92,4 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 2439,1 | — 3398,1 | — 350,1 | — 52,3 | — 72,9 | — 7,5 |
| 29-10-1961 au 13-10-1962.. | 4416,9 | 1948,4 | 1154,4 | 4305,6 | 44,1 | 26,1 | 97,4 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 2468,5 | — 3262,5 | — 111,3 | — 55,8 | — 73,8 | — 2,5 |
| *Période d'hiver :* | | | | | | | |
| 29-10-1961 au 12- 4-1962.. | 2630,6 | 963,0 | 1151,8 | 4299,2 | 36,6 | 43,7 | 163,0 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 1667,6 | — 1478,9 | + 1668,6 | — 63,4 | — 56,2 | + 63,4 |
| *Période d'été :* | | | | | | | |
| 12- 4-1962 au 13-10-1962.. | 1786,3 | 985,4 | 2,6 | 6,4 | 55,1 | 0,14 | 0,4 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 800,9 | — 1783,6 | — 1779,9 | — 45,0 | — 99,8 | — 99,7 |
| 12- 4-1962 au 5-11-1962.. | 2025,1 | 1253,6 | 105,7 | 6,4 | 61,9 | 5,2 | 0,3 |
| Déficit en Cl — ou excès en Cl + | » | — 771,5 | — 1919,4 | — 2018,7 | — 38,1 | — 94,8 | — 99,7 |

### 3° *Application à la nappe sous-jacente*

La nappe sous-jacente, à proximité immédiate des lysimètres, avait été atteinte par un forage et un piézomètre. Nous comptions l'utiliser pour la comparaison avec les lysimètres, mais nous nous sommes rapidement aperçu que l'eau du forage était contaminée, comme nous l'avons dit plus haut. Nous avons trouvé des concentrations extrêmement fortes en Cl : 78 - 85 mg/l, accompagnées d'une teneur en nitrate assez élevée, de l'ordre de 302,5 mg/l.

Nous avons fait des prélèvements au puits de la Préhistoire situé latéralement à 40 m des lysimètres. La teneur en chlore de l'eau du puits a été de : 42,5 mg/l le 5 février 1960, 35 mg/l le 20 mars 1961, 14 mg/l le 8 août 1961.

Nous prendrons la valeur de 14 mg/l du mois d'août pour calculer A, les autres valeurs correspondant, comme nous l'avons dit auparavant, à l'arrivée de la vague de concentration.

Du 5 août 1960 au 30 août 1961, la teneur moyenne en chlore de l'eau de pluie a été de 6,15 mg/l.

Le coefficient d'alimentation de la nappe serait donc de : $A = \frac{6,15}{14} = 43,9$. Ce chiffre concorde sensiblement avec celui de la case lysimétrique $D_3$ qui est de 42,7 %.

*Cette concordance est très importante : elle montre la validité de la méthode du chlore pour calculer le bilan de l'eau de cette nappe et de nappes semblables. Elle pourra probablement être appliquée dans un très grand nombre de cas.*

### 4° *Observations de Warrington, en 1887*

Nous trouverons une confirmation de nos conclusions dans des observations anciennes faites par Warrington (1887) sur des cases lysimétriques à Rothamsted. Warrington était déjà arrivé à la notion que « la composition de cette eau de drainage est le facteur principal qui détermine la composition des eaux des puits ».

Les cases lysimétriques étudiées avaient une surface de 1/1 000 d'acres, soit 4,046 m², et une profondeur de 20, 40, 60 inches, soit respectivement de 0,508 m, 1,016 m et 1,524 m.

Les masses de sol des lysimètres faisant partie d'un champ cultivé, avaient été isolées sans être dérangées. Elles étaient supportées par des plaques de fer perforées et entourées de mur de briques et de ciment. Le sol de chaque case était un limon lourd, mélangé de silex et reposant sur de la craie. Il n'avait pas été mis d'engrais depuis 1870, et il avait été maintenu sans végétation.

Dans le tableau ci-contre, nous donnons la teneur moyenne de cinq ans (1877 - 1886) de la hauteur de pluie et du chlore de l'eau de pluie à Rothamsted, ainsi que des exportations de chlore.

Il résulte de ce tableau que la quantité de chlore livrée par les eaux de drainage au cours de l'année, est presque exactement la même que celle qui a été apportée par l'eau de pluie. Remarquons que les cases sont dépourvues de végétation et que, par conséquent, il n'y a aucune rétention de chlore. On

a bien $P \times Cl\,p = D \times Cl_D$ et, par conséquent, $\frac{Cl\,p}{Cl_D} = \frac{D}{P}$.

Ce chlore permet de calculer le coefficient d'alimentation.

| Mois | Pluie | | | Lysimètres | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Inches | Cl ppm | Cl : livre/acre | 20 inches Cl : livre/acre | 60 inches Cl : livre/acre |
| Janvier..... | 2,24 | 3,35 | 1,70 | 0,52 | 0,55 |
| Février..... | 2,61 | 2,65 | 1,56 | 0,80 | 0,80 |
| Mars..... | 1,40 | 3,48 | 1,10 | 0,75 | 0,71 |
| Avril..... | 2,45 | 1,77 | 0,98 | 0,61 | 0,61 |
| Mai..... | 2,48 | 1,43 | 0,80 | 0,61 | 0,52 |
| Juin..... | 2,72 | 1,15 | 0,71 | 0,77 | 0,77 |
| Juillet..... | 2,70 | 0,82 | 0,50 | 1,09 | 0,93 |
| Août..... | 3,01 | 1,06 | 0,72 | 1,85 | 1,73 |
| Septembre... | 3,00 | 1,22 | 0,83 | 2,18 | 2,17 |
| Octobre..... | 3,36 | 2,73 | 2,04 | 1,76 | 1,74 |
| Novembre... | 3,30 | 2,68 | 2,00 | 1,58 | 1,65 |
| Décembre.... | 2,38 | 2,71 | 1,46 | 2,11 | 1,85 |
| Année..... | 31,65 | » | 14,40 | 14,63 | 14,03 |
| Moyenne annuelle.... | » | 2,01 (1) | » | » | » |

Dans le tableau suivant, on a reporté les observations faites de juin 1877 à mars 1886 et donnant les moyennes de neuf ans.

(1) Cette moyenne n'est pas la moyenne des différentes concentrations, mais la concentration moyenne annuelle de l'eau obtenue en multipliant la hauteur de pluie mensuelle par la concentration correspondante, puis en divisant la somme de toutes les valeurs mensuelles ainsi trouvées par la hauteur pluviométrique annuelle.

| Mois | Pluie inches | Drainage (en inches) | | Chlore (ppm) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Lysimètre 20 inches | Lysimètre 60 inches | Lysimètre 20 inches | Lysimètre 60 inches |
| Mars..... | 1,40 | 0,57 | 0,61 | 4,0 | 4,0 |
| Avril..... | 2,45 | 0,90 | 0,98 | 3,9 | 3,6 |
| Mai..... | 2,48 | 0,79 | 0,79 | 4,2 | 4,0 |
| Juin..... | 2,72 | 0,75 | 0,74 | 3,6 | 3,6 |
| Juillet..... | 2,70 | 0,61 | 0,54 | 4,4 | 4,3 |
| Août..... | 3,01 | 1,01 | 0,93 | 3,3 | 3,7 |
| Septembre... | 3,00 | 1,26 | 1,09 | 3,8 | 3,8 |
| Octobre..... | 3,36 | 2,15 | 1,95 | 3,8 | 3,9 |
| Novembre... | 3,30 | 2,46 | 2,32 | 3,9 | 4,1 |
| Décembre.... | 2,38 | 2,00 | 1,99 | 3,9 | 3,9 |
| Janvier..... | 2,24 | 1,91 | 1,94 | 3,7 | 3,8 |
| Février..... | 2,61 | 2,35 | 2,17 | 4,0 | 3,8 |
| Année..... | 31,65 | 16,77 | 16,05 | « | « |
| Moyenne.... | « | « | « | 3,9 | 3,9 |

Nous avons alors calculé les rapports D/P (drainage/pluviométrie) et Cl p/Cl D (chlore de l'eau de pluie/chlore de l'eau de drainage), et obtenons les chiffres suivants :

| Mois | Lysimètre : 20 inches | | Lysimètre : 60 inches | |
|---|---|---|---|---|
| | D/P | Cl p/Cl D | D/P | Cl p/Cl D |
| Mars..... | 0,41 | 0,87 | 0,44 | 0,87 |
| Avril..... | 0,37 | 0,45 | 0,40 | 0,49 |
| Mai..... | 0,32 | 0,34 | 0,32 | 0,36 |
| Juin..... | 0,28 | 0,32 | 0,27 | 0,32 |
| Juillet..... | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,19 |
| Août..... | 0,34 | 0,32 | 0,31 | 0,29 |
| Septembre..... | 0,42 | 0,32 | 0,36 | 0,32 |
| Octobre..... | 0,63 | 0,72 | 0,58 | 0,70 |
| Novembre..... | 0,74 | 0,69 | 0,70 | 0,65 |
| Décembre..... | 0,84 | 0,69 | 0,83 | 0,69 |
| Janvier..... | 0,85 | 0,91 | 0,87 | 0,88 |
| Février..... | 0,90 | 0,66 | 0,83 | 0,70 |
| Moyenne annuelle..... | 0,530 | 0,613 | 0,505 | 0,613 |

Il est tout d'abord à remarquer que la moyenne annuelle en chlore de l'eau de pluie n'est que de 2,01 mg/l, tandis que la concentration de l'eau de drainage est de 3,9 mg/l. Cette augmentation du chlore de l'eau de drainage est due à l'évapotranspiration, ce qui donne un rapport Cl p/Cl D de 0,513. Or ce rapport est très voisin du coefficient d'alimentation des cases lysimétriques de 0,530.

Nous n'avons pu calculer Cl p/Cl D durant la même période pour l'eau de pluie et l'eau de drainage. Nous le regrettons, car nous savons que la concentration en chlore de l'eau de pluie varie suivant les moments de l'année. Cela explique la différence.

Les observations de Warrington ne donnent que des moyennes et ne permettent pas de suivre les phénomènes. De plus, on remarquera que les lysimètres ont drainé en été, alors qu'il n'en était pas ainsi à Talence. Cela est dû à ce que l'évaporation est plus faible en été à Rothamsted. L'humidité de l'air y est plus grande, la température moins élevée, les rayons solaires frappent plus obliquement le sol. D'autre part, les chutes de pluie sont plus faibles de juillet à septembre.

### 5° *Lysimètres de l'Ariana (Tunisie)*

Très peu d'études lysimétriques ont donné les exportations en chlore et surtout le chlore de l'eau de pluie. Nous pouvons cependant citer les lysimètres de l'Ariana, près de Tunis, d'après les observations de F. Bœuf et V. Novikoff (1936).

Cultures de 1934 - 1935 après celles de 1933 - 1934.

| | P | Q | A (p. 100) | Cl q | Q × Cl q | A' (p. 100) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Blé après jachère.. | 638,8 | 240,0 | 37,4 | 77,3 | 18 540 | 31,0 |
| Jachère après blé. | 638,8 | 166,8 | 26,1 | 184 | 30 730 | 13,0 |
| Blé après blé..... | 638,8 | 108,7 | 15,5 | 165 | 17 930 | 14,5 |
| Fourrage après blé. | 638,8 | 6,4 | 1 | 253 | 1 620 | 9,5 |
| Jachère continue.. | 638,8 | 302,6 | 47,4 | 75 | 22 580 | 31,9 |

P est la pluie en millimètres, Q la quantité d'eau de drainage en millimètres; $A = P/Q \times 100$ i.e. le coefficient d'alimentation. Cl q est la concentration (mg/l) en NaCl de l'eau de

drainage. Q × Cl q est la quantité totale de NaCl exportée par les eaux.

D'après Soulmagnon (1929), la teneur moyenne annuelle en NaCl de l'eau de pluie serait de 24 mg, chiffre que nous avons adopté pour Cl p; le coefficient A' = Cl p/Cl q, comme on le voit, est assez proche de celui de A, le coefficient calculé d'après la pluie et le drainage. Mais il faut considérer la valeur de Cl p comme approximative, d'autant plus que si l'on fait le produit Cl p × P, on obtient le chiffre de 15 331 mg qui est bien inférieur au produit Q × Cl q. La différence ne peut s'expliquer que par une valeur trop faible de Cl p ou bien une libération du chlore emmagasinée pendant l'année précédente.

On voit par là que pour obtenir des résultats satisfaisants, il faut avoir un dosage exact du chlore de l'eau de pluie, non pas par quelques mesures, mais par des mesures continuelles surtout lorsque l'on est au voisinage de la mer; il est alors nécessaire de faire des observations sur plusieurs années pour les cases lysimétriques.

---

# CHAPITRE III

## LE BILAN DU CHLORE ET DE L'EAU DANS LES NAPPES DES « SABLES DES LANDES »

### I. — INTRODUCTION

#### A. — Historique

L'étude précédente nous a montré que l'on pouvait calculer le bilan hydrologique des cases lysimétriques et des nappes, si l'on connaît les teneurs en chlore de l'eau de pluie et de l'eau de la nappe. C'est ce que nous ferons pour les nappes des « Sables des Landes ».

Mais nous voulons donner auparavant un court historique.

Déjà, Jackson (1905) avait montré que, dans la région atlantique des Etats-Unis, il y avait une diminution de la concentration en chlore des eaux superficielles et des eaux souterraines depuis la côte (entre la frontière canadienne et New York) jusqu'au Saint-Laurent et les lacs Ontario et Erié. Au voisinage de la côte, la teneur en chlore est de 6 mg/l; à l'intérieur, dans la région du lac Erié et du lac Ontario, elle n'est plus que de 0,2 mg/l. Il attribuait au chlore une origine marine. Mais il ne donnait aucune relation numérique entre le chlore des eaux superficielles et souterraines et le chlore de l'eau de pluie.

En 1941, H. Schœller montra l'influence du climat, c'est-à-dire de la pluviométrie et de l'évapo-transpiration sur la concentration et la composition chimique des eaux souterraines.

Le premier auteur qui ait cherché à utiliser le chlore de l'eau de pluie et le chlore des eaux souterraines pour calculer le coefficient d'alimentation des nappes est Anderson (1945).

S'il n'y a pas de ruissellement, le rapport du débit des nappes (Vn) à l'apport d'eau par la pluie (Vp) est égal au rapport entre la concentration Cp en Cl de l'eau de pluie et la concentration Cn de la nappe : $\frac{Vn}{Vp} = \frac{Cp}{Cn}$. Il applique cette formule à quatre exemples en Australie.

Gatewood, Robinson, Colby, Hem et Halpeny (1950) avaient déjà utilisé le chlore pour calculer l'évapo-transpiration dans le fond de la basse vallée de Safford, dans l'Arizona. L'eau des nappes latérales se déverse dans les alluvions de la basse vallée où elle est en partie évaporée par la végétation. Ces auteurs partaient de ce principe que si $Q_i$ est le débit de l'eau de la nappe latérale de concentration $C_i$ en chlore, et $Q_o$ le débit de l'eau de la nappe dans le fond de la vallée avec une concentration $C_o$ en chlore, on a la relation $Q_o = Q_i \frac{C_i}{C_o}$ et pour la quantité $Q_d$ évapo-transpirée :

$$Q_d = Q_i - Q_o = Q_i - Q_i \frac{C_i}{C_o}.$$

Ils ont ainsi obtenu, dans les différentes parties de la vallée :

| | $Q_i$ | $C_i/C_o$ | $Q_d$ | H |
|---|---|---|---|---|
| De Thatcher à Glenbar | 20 200 | 0,702 | 6 020 | 0,698 |
| De Glenbar à Fort Thomas | 11 200 | 0,534 | 5 220 | 0,702 |
| De Fort Thomas à Black-Point | 13 600 | 0,736 | 3 590 | 0,494 |

$Q_i$ et $Q_d$ sont exprimés en acre-feet par an, H est la hauteur d'eau évapo-transpirée exprimée en mètres (nous l'avons calculée à partir de $Q_d$).

Les auteurs ont comparé les résultats de cette méthode à ceux qu'ils avaient obtenus autrement. Les pourcents au-dessus ou au-dessous de la moyenne de toutes les méthodes sont les suivants :

| Méthodes | Pourcents au-dessus (+) Pourcents au-dessous (—) |
|---|---|
| Cuves | + 18,7 |
| Puits de transpiration | — 6,4 |
| Drainage - écoulement | + 18,6 |
| Entrée - sortie | + 5,2 |
| Accroissement du chlore | — 16,2 |
| Pente - drainage | — 19,9 |

La méthode du chlore a par conséquent la même précision que les autres. Elle aurait d'ailleurs pu donner des résultats beaucoup plus précis, si l'analyse des isochlores avait été poussée plus loin. Pour déterminer $C_i$ et $C_o$, les auteurs s'étaient bornés à établir des moyennes.

En 1958, Eriksson (1958) indique que si l'on suppose que le chlore est d'origine marine, l'on doit avoir la relation :

$$C_g = C_N \times \frac{N}{N - E}$$

dans laquelle $C_g$ est la concentration en chlore de l'eau souterraine, $C_N$ la concentration en chlore de l'eau de pluie, N est le total annuel des précipitations atmosphériques et E le total annuel de l'évapo-transpiration, mais aucune application n'est faite.

Burdon et Mazloum (1961) montrent, en 1958, au Symposium de l'U. N. E. S. C. O., à Téhéran, à l'aide d'un graphique, la relation qui existe entre la hauteur de pluie et la teneur en sels des eaux en Syrie. La teneur en sels est d'autant plus élevée que la hauteur de pluie est plus faible, et elle serait due en grande partie à la concentration par évapo-transpiration des sels apportés par la pluie qui contient en moyenne 20 mg/l, dont 3 mg de Cl.

En 1958, Loewengart indiqua, pour Israël, un strict parallélisme entre l'accroissement de la teneur en chlore des eaux souterraines, la diminution des précipitations et le facteur de Thornthwaite.

En 1960, H. Schœller a donné les formules générales reliant le coefficient d'alimentation des nappes d'eau souterraines, les coefficients de ruissellement, la dissolution du chlore des roches, la concentration en chlore de l'eau de pluie, la concentration en chlore de l'eau souterraine que nous avons exposées plus haut. Il a donné aussi des exemples précis de calcul du coefficient d'alimentation basé sur ce principe (cases lysimétriques de l'Ariana, en Tunisie, Source du Kef).

En 1961, Loewengart reprend la formule donnée par Eriksson et, à l'aide de la teneur en chlore de l'eau des sources, la hauteur de pluie et le taux d'infiltration théorique, il calcule la quantité de chlore précipitée par l'eau de pluie. C'est, somme toute, le problème inverse de celui que nous abordons.

Yaalon (1961) indique que l'on peut calculer la concentration Cn en chlore des eaux souterraines à l'aide de la formule :

$$Cn = Cp \left( \frac{P - Rst}{P - Rst - E} \right)$$

dans laquelle Cp est la concentration moyenne en chlore de l'eau de pluie, P est la pluviométrie, E l'évaporation et Rst le ruissellement dû aux fortes précipitations. Il calcule ainsi la concentration en chlore des eaux souterraines de quelques bassins d'Israël. C'est également un problème inverse de celui que nous avons abordé.

Mais au lieu de s'adresser à l'eau des nappes souterraines, on peut utiliser les eaux superficielles, les rivières, en particulier dans les régions arides. Déjà Anderson (1945) avait montré que si l'on connaît la quantité de chlore de l'eau de pluie et le rapport entre la quantité d'eau écoulée annuellement par un bassin et la quantité d'eau tombée sur ce bassin, on pourrait calculer la teneur en chlore de l'eau des rivières. On a en effet, pour la concentration Ca en sels de l'eau des rivières : $C_R = \frac{C_P}{V_R/V_P}$, $C_P$ étant la concentration en sels de l'eau de pluie, $V_R/V_P$ étant le rapport entre la hauteur des pluies et l'écoulement dans un bassin fluvial.

Le tableau suivant permet de comparer la concentration calculée et la concentration réelle en chlore, en mg/l, de l'eau des différentes rivières.

| Bassin | Surface (km²) | Pluie (en mm) | Ecoulement pluie | Concentration moyenne en Cl | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Eau de pluie | Eau de rivière | |
| | | | | | calculée | réelle |
| Upper Murray (Vict.)... | 26 600 | 842 | 0,283 | 1,0 | 3,5 | 3,4 |
| O'Shannany River (Vict.). | 121 | 1 620 | 0,520 | 2,7 | 5,2 | 4,75 |
| Yarra River (Vict.)..... | 3 710 | 642 | 0,075 | 8,4 | 112,0 | 134,0 |
| Helena River..... | 1 480 | 713 | 0,034 | 6,7 | 197,0 | 203,0 |

Plus tard, Eriksson (1955) montre que les rivières de la côte atlantique des Etats-Unis sont d'autant plus chargées en chlore qu'elles sont plus près de la côte, i.e., que le chlore est

en grande partie océanique. Mais il ne donne pas de relation avec l'indice d'écoulement des rivières.

### B. — Calcul du bilan a l'aide du chlore

Pour établir le bilan d'une nappe, il suffit, en principe, de connaître la teneur en tel ou tel ion, à la fois dans l'eau de pluie et dans l'eau de la nappe. En réalité, tous les ions ne conviennent pas :

Les ions $HCO_3^-$, $SO_4^=$, $Na^+$, $K^+$, $Ca^{++}$ subissent à la longue des modifications chimiques; ils peuvent être également sous la dépendance d'agents modificateurs : $HCO_3^-$ par exemple, est sous la dépendance directe de la tension de $CO_2$; $SO_4^=$ peut être réduit; $Na^+$, $K^+$, $Ca^{++}$, qui sont souvent en quantité notable dans le sol, peuvent être affectés par des échanges de bases.

Les chlorures seuls, sont, d'une part, en quantité relativement faible dans le sol; d'autre part, à cause de leur activité chimique, ils ne sont pas pratiquement affectés par les phénomènes modificateurs. Ils peuvent donc être retenus plutôt que les autres éléments.

La teneur en chlore des eaux souterraines augmente avec l'aridité du climat, donc avec l'évaporation. Il est normal de penser qu'il y a un lien entre les chlorures de l'eau de pluie, ceux de la nappe et l'évaporation; dans ce cas, le dosage des chlorures de l'eau de pluie et de l'eau des nappes doit permettre de calculer le coefficient d'alimentation de la nappe. Ce dosage est facile et rapide; il n'exige qu'un matériel simple et peu coûteux.

L'eau de pluie contient déjà une certaine quantité de chlorures (de 2 à 15 mg/l). Elle traverse le sol en dissolvant les chlorures qui peuvent s'y trouver jusqu'à la nappe. Toutefois, il faut tenir compte des jeux successifs des chutes de pluie, de l'évaporation, de l'évapo-transpiration. Il y a tantôt des descentes de chlorure avec dilution quand il y a des précipitations abondantes, tantôt des remontées avec concentration si l'évaporation est intense. Des pluies abondantes peuvent de nouveau entraîner vers la nappe en les diluant les eaux concentrées.

Comme H. Schœller (1960 et 1962) l'a montré, on peut calculer le coefficient d'alimentation d'une nappe, si l'on connaît les concentrations en chlore de l'eau de pluie et de l'eau de la nappe. Mais nous avons déjà montré (p. 88 et suivantes) qu'il

est en plus nécessaire de tenir compte du chlore retenu par la végétation pour établir une équation complète. Reprenons nos premières équations, établies pour les cases lysimétriques, et complétons-les pour l'application aux nappes d'eau souterraines. Soient P la hauteur de pluie, en mm; Clp la concentration en mg/l du chlore de l'eau de pluie. Si R est le coefficient de ruissellement par rapport à 1, le coefficient d'infiltration à travers la surface du sol est : 1 — R et la quantité de chlore qui entre dans le sol sera :

$$P(1 - R) \times Clp, \text{ en mg/m}^2.$$

Il s'y ajoute la quantité r (en mg/m²) de Cl dissous dans le sol à la concentration Cl r.

Mais il en est retranché la quantité r v qui est retenue par la végétation par m² et ajouté la quantité r v' restituée au sol après la mort des végétaux.

Enfin, s'il y a possibilité de dissolution de chlore à l'intérieur des terrains, il faudra compter avec un apport r t. Tout ce chlore gagne l'eau de la nappe et on doit l'y trouver en quantité N × Cl n, N étant le volume d'eau de pluie ayant échappé à l'évapo-transpiration et ayant gagné la nappe. On a donc :

$$N \times Cl\,n = (1 - R)\,P \times Cl\,p + r + r\,t - r\,v + r\,v'.$$

Et A = N/P étant le coefficient d'alimentation :

$$A = (1 - R)\,\frac{Cl\,p}{Cl\,n} + \frac{r + r\,t - r\,v + r\,v'}{P \times Cl\,n}.$$

Cette dernière formule représente le cas général.

En France et dans les régions tempérées, la quantité r + r t de chlore dissous en provenance du sol est en moyenne de 4 mg/m² par an. S'il tombe annuellement environ 1 000 mm d'eau de pluie, avec un coefficient d'alimentation de 0,5, $\frac{r + r\,t}{P \times A} = \frac{4}{1\,000 \times 0{,}5} = 0{,}008$ mg/l. L'apport vers la nappe de 0,008 mg/l de chlore est négligeable. Cela permet de supprimer $\frac{r + r\,t}{P \times A}$ devant Cl n.

On arrive à la formule du cas général :

$$A = (1 - R)\,\frac{Cl\,p}{Cl\,n} - \frac{r\,v - r\,v'}{P \times Cl\,n}.$$

Si l'on examine le cas particulier où le ruissellement est nul et où la quantité de chlore absorbée par la végétation est intégralement restituée après leur mort, au sol, la formule précédente devient : $A = \frac{Cl\ p}{Cl\ n}$.

Cette deuxième formule nous permet de calculer directement le coefficient d'alimentation, si nous connaissons les teneurs en chlorures de l'eau de pluie et de la nappe correspondante pour une durée déterminée.

Il est certain qu'il faut tenir compte de l'apport du chlore par les fumures et les engrais (Matthess, 1958). Ainsi, d'après Popp (1931), le fumier d'écurie renferme en moyenne 0,13 % de Cl. Avec une fumure de 40 t/h, il est donc apporté 52 kg/Cl par hectare. Si l'on ne fume que tous les trois ans, on voit qu'il y a un apport de 1,73 g de chlore par m² et par an.

Lorsque l'on emploie des engrais potassiques, on ajoute encore du chlore. Ceux-ci contiennent environ un tiers de Cl en poids. D'après Popp, pour une partie de $K_2O$ utilisé, il s'échappe une partie de Cl. A titre d'exemple, signalons, d'après le même auteur, qu'en 1920, on utilisa 18,44 kg de $K_2O$ par hectare traité. On a donc répandu environ 2 g de Cl par mètre carré et par an. Nöring cite le chiffre de 4,1 g par mètre carré et par an. Naturellement, on n'utilise pas un amendement aussi intensif dans toutes les régions.

Admettons qu'il y ait un apport de 2 à 4 g de chlore par an et que l'alimentation des nappes soit de 500 à 250 mm par an, on voit qu'il y aura de ce fait une augmentation de la teneur en chlore de l'eau de la nappe, dans le premier cas de 4 à 8 mg/l, et dans le second cas de 9 à 16 mg/l. Matthess (1958) explique aussi pourquoi la teneur en chlore des eaux souterraines est de six à onze fois plus élevée sous les champs que dans les forêts, entre Worms et Speyer, en Allemagne.

| Forêt | Cl (mg/l) | Champs | Cl (mg/l) |
|---|---|---|---|
| N° 281 ..... | 11,7 | N° 15 ..... | 75,2 |
| N° 283 ..... | 6,4 | N° 25 ..... | 69,4 |
| N° 289 ..... | 10,0 | N° 213 ..... | 85,2 |

Mais on voit quand même que la différence entre le Cl de l'eau sous-forêt et sous-champ, qui est de l'ordre de 60 à 80 mg/l, est bien plus grande que l'apport par la fumure et

les engrais. Il se peut que cette différence provienne du coefficient d'alimentation.

### C. — Choix des Landes comme région d'application

Nous venons de voir que le coefficient d'alimentation peut se calculer à l'aide de la formule : $A = \frac{Cl\,p}{Cl\,n}$ lorsque le ruissellement est nul, l'apport de chlore par le terrain négligeable et lorsque le chlore absorbé par les végétaux est restitué au terrain après leur mort, enfin lorsque l'on n'ajoute pas des amendements de KCl. Un tel cas se trouve dans la nappe phréatique des « Sables des Landes ».

#### 1° *Géologie du Bassin d'Aquitaine*

Les « Sables des Landes » forment un vaste triangle s'étendant principalement sur le département de la Gironde et celui des Landes. Cette zone est de formation sédimentaire et remonte au Quaternaire. Le triangle a pour sommet l'embouchure de la Gironde, ses côtés vont jusqu'à Nérac à l'Est, Saint-Girons à l'Ouest. Une bande de Quaternaire récent borde le côté Est; elle s'amincit du Nord au Sud. Au Nord, elle est large de 15 km à partir des rives de la Gironde; au Sud, elle ne mesure plus que 1 km. A l'Ouest, en bordure de la mer, il y a une étroite bande de terrain large de 5 km environ; elle comprend des dunes récentes et anciennes.

Les Sables des Landes se présentent surtout sous forme de sable blanc, à grains de quartz, souvent arrondis, de taille comprise entre 0,2 et 0,6 mm de diamètre. Parfois, il y a des intercalations d'argile. Des couches d'alios se rencontrent fréquemment à faible profondeur. Les Sables des Landes ont une épaisseur de 10 à 60 mètres suivant les endroits. Ils reposent sur une couche de gravier appartenant au Quaternaire ancien.

#### 2° *Hydrologie souterraine*

Les Sables des Landes renferment une nappe d'eau qui imbibe non seulement les sables eux-mêmes, mais les graviers situés en-dessous.

C'est une nappe phréatique dont la surface piézométrique est en général à faible profondeur. Très souvent, elle est au voisinage de la surface du sol, en particulier dans les zones mal drainées, dans les grands espaces plats des landes qui séparent les cours d'eau. Mais à l'approche de ces cours d'eau profondément encaissés dans le plateau landais, la surface de

la nappe s'abaisse brusquement pour se raccorder au lit de la rivière. Au voisinage des ruptures de pente elle se trouve ainsi à plus grande profondeur (5 à 10 m) sous la surface du sol. Il est à remarquer que les bancs d'alios peuvent donner lieu à des nappes suspendues de faibles dimensions latérales.

La nappe phréatique des « Sables des Landes » est alimentée par sa propre surface; le ruissellement peut être considéré comme nul, car ces sables ont une très grande perméabilité.

Par contre, l'évapo-transpiration peut être très importante à cause de la forêt, surtout lorsque les arbres puisent tout au cours de l'année leur eau dans la nappe. L'écoulement de la nappe se fait par les cours d'eau qui constituent autant de drains naturels.

### 3° *Hydrologie superficielle*

On observe ainsi autant de zones de drainage que de bassins fluviaux. La répartition de ces zones de drainage est assez simple; on distingue :

*a)* Une zone centrale drainée par l'Eyre et ses deux principaux affluents : la Grande Eyre et la Petite Eyre. Cette zone de drainage se trouve au milieu des Hautes Landes et s'étend au Sud jusqu'aux hauts lieux de Sabres et de Labrit. Il est à remarquer que la zone de drainage aboutit à l'Océan après s'être déversée dans le Bassin d'Arcachon;

*b)* Une zone de drainage bordière, qui va directement vers l'Océan; elle comprend autant de petits cours d'eau que d'étangs : étangs de Mimizan, de Biscarrosse, de Cazaux, de Lacanau, de Carcans. Ces étangs, en particulier ceux du Sud, correspondent à autant d'estuaires barrés par le cordon dunaire;

*c)* Une zone de drainage bordière se jetant dans la Gironde et la Garonne, avec les ruisseaux de Castelnau, la Jalle de Saint-Médard, le Gat-mort, le Ciron et bien d'autres. Mais à part le Gat-mort et le Ciron, ces ruisseaux entament à peine les Sables des Landes;

*d)* Une zone de drainage au Sud, par un certain nombre d'affluents de l'Adour, en particulier par la Midouze et ses affluents, le Laretjon, le Lixson, l'Estrigon, la Douze.

Tous ces cours d'eau sont essentiellement alimentés par les nappes phréatiques des Sables des Landes. Ils ne reçoivent que très peu d'eau provenant du ruissellement superficiel

proprement dit : évidemment, en hiver, après les longues périodes de précipitations atmosphériques, ils peuvent entrer en crue; mais cette eau des crues provient de l'écoulement cortical, c'est-à-dire de l'eau circulant dans la partie supérieure du sol, au-dessus du niveau normal des nappes.

### 4° *Teneur en chlore de l'eau de pluie*

Dans le cas des « Sables des Landes », nous appliquerons, comme nous l'avons expliqué plus haut, la formule $A = \frac{Cl\ p}{Cl\ n}$.

Précédemment, nous avions établi pour l'année 1958 une carte des isochlores de l'eau de pluie du Bassin d'Aquitaine (M. Schœller, 1960). Après l'avoir faite mois par mois, nous en avons tiré les isochlores annuels (fig. 18).

Nous avons établi les teneurs mensuelles et annuelles en chlore de l'eau de pluie de 23 postes météorologiques, répartis entre plusieurs départements voisins : Gironde, Landes, Lot-et-Garonne et Gers. Certains de ces postes se trouvent au bord de la mer ou à proximité immédiate de la côte; les autres, à l'intérieur des terres, à des distances variables, allant jusqu'à 125 km environ de la côte. Cela nous a permis d'établir des comparaisons entre les teneurs en chlore de l'eau de pluie, en fonction de l'éloignement de la côte, et par là-même, de préciser l'importance du transport des chlorures par les vents.

A chaque poste météorologique, l'eau de toutes les pluies tombées pendant le mois a été recueillie dans un même récipient en polyéthylène; le dosage du chlore a été fait sur la totalité.

Les résultats du dosage du chlore de l'eau de pluie de chacun de ces postes météorologiques nous ont permis de dresser des courbes isochlores mensuelles puis annuelles, et de nous rendre compte ainsi des variations de la répartition des retombées du chlore.

Les résultats sont les suivants : les concentrations en chlorures sont toujours très fortes au bord de la mer puis décroissent rapidement vers l'intérieur du pays et finissent (d'ailleurs à des distances variables) par s'égaliser d'une manière relativement constante. Elles peuvent varier de 50 mg/l au bord de la mer, à 1,75 mg/l à l'intérieur du pays. Nos observations sont en accord avec celles qui ont été faites en d'autres pays d'une manière moins systématique : la source du chlore de l'eau de pluie est donc bien l'océan et ses

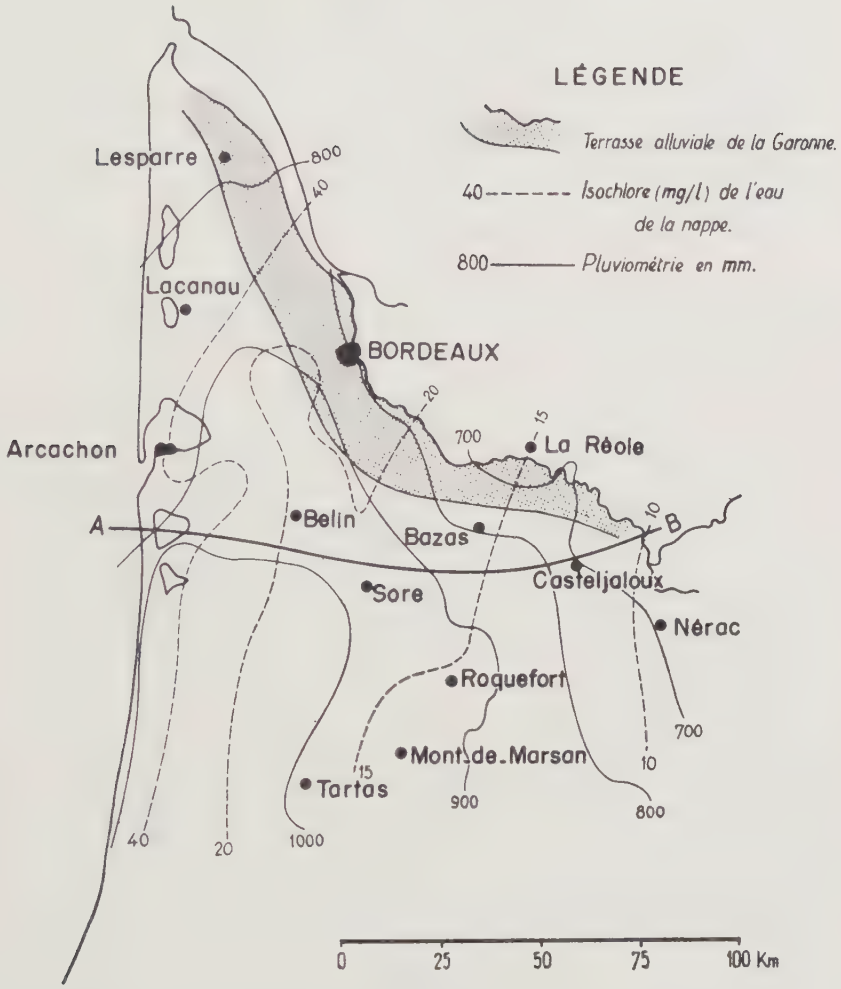



Fig. 18.

Pluviométrie et isochlores de l'eau de la nappe en période de hautes eaux.

embruns. Ce chlore est transporté plus ou moins loin vers l'intérieur du pays selon la force et la direction des vents. On peut le trouver jusqu'à une cinquantaine de kilomètres à l'intérieur. Enfin, le transport au loin du chlore par les nuages se fait fréquemment à l'intérieur de zones étroites; cela est particulièrement visible sur les cartes de février, mars, mai, juin, juillet. Ces avances étroites de fortes concentrations en

chlorures, qui se produisent lors des tempêtes, peuvent pénétrer jusqu'à plus de 100 km des côtes.

Dans le Bassin d'Aquitaine, donc, la teneur en chlore de l'eau de pluie décroît de la côte vers l'intérieur. Sans doute les isochlores de l'eau de pluie ne sont pas rigoureusement parallèles ni entre eux, ni par rapport à la côte. Néanmoins, la décroissance peut être approximativement exprimée par l'équation :

$$Cl = 16\,e^{-0{,}0462\,x} + 7\,e^{-0{,}00231\,x}$$

dans laquelle Cl est la teneur en mg/l du chlore de l'eau de pluie à la distance x de la côte (x est exprimé en km).

### 5° *Teneur en chlore de l'eau des nappes*

Depuis cette étude sur les isochlores des eaux de pluie, nous avons dosé les chlorures d'un grand nombre de puits du Bassin d'Aquitaine. Nous en avons reporté les concentrations sur une carte de la région, et nous avons dressé les courbes isochlores. La comparaison des deux cartes d'isochlores montre avec évidence qu'il y a diminution de la teneur en chlore d'Ouest en Est, aussi bien pour l'eau des nappes que pour l'eau de pluie. Cela semble bien dénoter un rapport entre les deux phénomènes.

Si nous examinons la carte isochlore des nappes, nous faisons les remarques suivantes (fig. 18 et 19) :

Le long de la côte, les teneurs en chlore de l'eau des puits sont élevées : 115 mg/l à Saint-Girons-Plage (Landes), 213 à 242 mg/l au Cap-Ferret (Gironde), 110 mg/l à Lacanau.

Depuis la côte vers l'intérieur, il y a quatre isochlores : 40, 20, 15, 10 mg/l d'Ouest en Est. Pour les puits situés entre les isochlores 40 et 20, les teneurs en chlore sont de 21 mg/l à Ychoux et à Escource (Landes) ; 25 mg/l à Poms; 32 mg/l à Facture (Gironde) ; 40 mg/l au bord du Bassin d'Arcachon; 25 à 29 mg/l à 1 km à l'Est de Salles (Gironde).

Pour les puits situés entre les isochlores 20 et 15 qui occupent la partie centrale de la carte, les concentrations en chlore sont les suivantes : 19 mg/l à Captieux (Landes), 16 mg/l à Sabres (Landes).

Les puits situés entre les isochlores 15 et 10 mg/l ont des concentrations de 13 mg/l à Houeilles, 11 mg/l à Durance, 14 mg/l à Réau.

A l'Est, les concentrations varient de 0 à 10 mg/l.

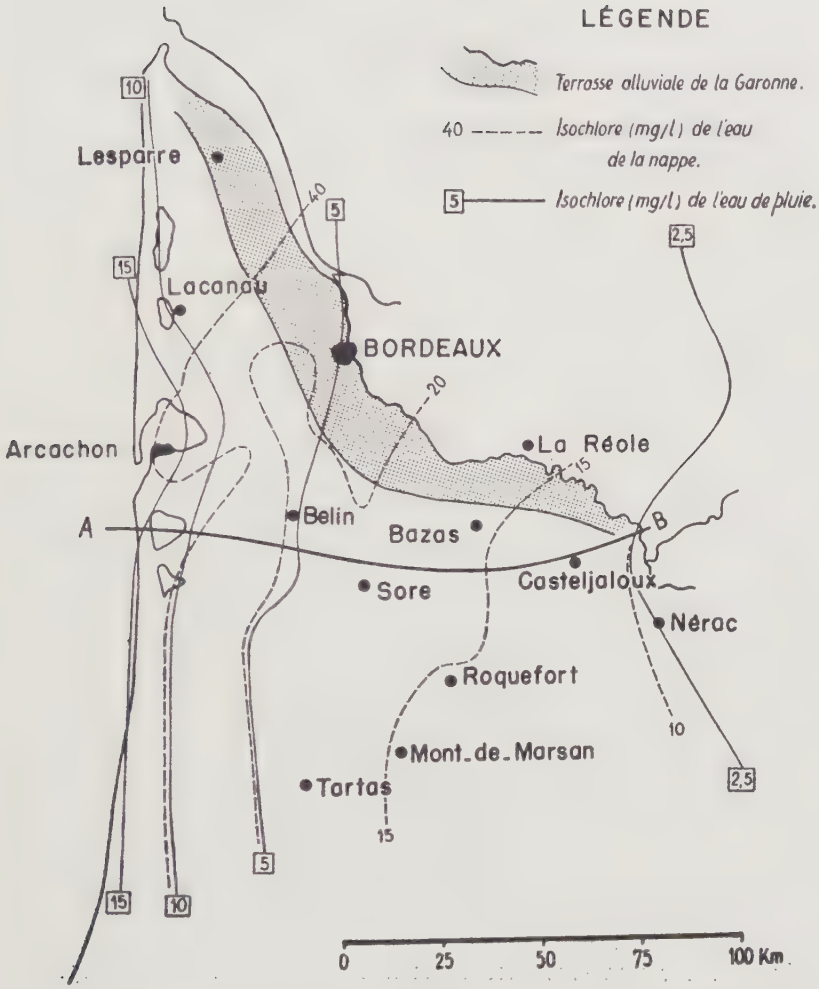



Fig. 19.

Isochlores de l'eau de la nappe en période de hautes eaux et isochlores de l'eau de pluie.

Toutefois, il peut y avoir des perturbations locales à l'intérieur des différentes zones : les concentrations en chlore pouvant être supérieures ou inférieures à la valeur moyenne. Nous en avons relevé un certain nombre à l'intérieur de chacune des zones.

Ces perturbations locales peuvent être dues à des pollutions, à des intensités différentes de l'évapo-transpiration. La forêt

absorbe plus d'eau lorsque la nappe est à faible profondeur sous le sol. Les perturbations locales au voisinage de la mer peuvent être créées par des inégalités de l'apport du chlore par les pluies.

Ces inégalités que nous avons constatées nous ont amené à traiter les problèmes par les méthodes statistiques.

## II. — LA ZONE SUD EN PÉRIODE DE HAUTES EAUX

(FIN HIVER-PRINTEMPS - mars - avril)

Si l'on superpose la carte des isochlores de l'eau des nappes sur celle de l'eau de la pluie, on voit qu'il y a entre les deux une relation certaine.

Nous l'avons dit plus haut : il y a une tendance générale; la concentration en chlorures décroît de l'Océan vers l'intérieur pour les nappes comme pour l'eau de pluie. Sur la carte (fig. 19), nous voyons qu'au Sud d'une ligne Cazaux - Casteljaloux il y a une grande régularité dans la superposition. Les isochlores de l'eau de pluie, 10 mg/l, 5, 2,5 coïncident successivement avec les isochlores 40, 20, 10 mg/l de l'eau de la nappe phréatique.

Toutefois, au Nord de la même ligne, s'il y a encore, généralement, décroissance pour les nappes et pour l'eau de pluie, nous observons un assez grand nombre d'irrégularités pour les isochlores des nappes. Il n'y a plus coïncidence en tous les points : par exemple, aux abords de l'étang de Biscarrosse, du Bassin d'Arcachon, au Nord de Bordeaux. (L'isochlore 40 de la nappe ne coïncide pas avec l'isochlore 10 de la pluie.) De même en d'autres points, l'isochlore 20 de la nappe ne coïncide pas avec l'isochlore 5 de la pluie.

Cette différence entre les régions Nord et Sud peut s'expliquer de la manière suivante : au Nord de la ligne Arcachon-Casteljaloux, des alluvions se trouvent en bordure des « Sables des Landes ». Dans ces alluvions, les conditions d'évapo-transpiration sont vraisemblablement différentes.

C'est pourquoi nous divisons notre étude en deux parties : l'une concerne le Sud, l'autre le Nord de la ligne A-B Cazaux-Casteljaloux.

## A. — Statistiques générales des concentrations en chlore de la zone Sud

La statistique générale des teneurs en chlore de l'eau des puits compris entre les isochlores de l'eau de pluie > 15, 15 à 10; 10 - 5; 5 - 2,5 a donné les résultats suivants :

Statistique générale (en % et cumulés)

| Clp..... | > 15 | | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits.. | 1 | | 7 | | 18 | | 44 | |
| Cln..... | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 0 - 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10,9 |
| 10 - 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 21,8 | 52 | 62,4 |
| 20 - 29 | 0 | 0 | 14 | 13,8 | 50 | 71,3 | 15 | 77,2 |
| 30 - 39 | 0 | 0 | 14 | 27,7 | 5 | 76,2 | 10 | 87,2 |
| 40 - 49 | 0 | 0 | 0 | 27,7 | 11 | 87,2 | 5 | 92,1 |
| 50 - 59 | 0 | 0 | 0 | 27,7 | 6 | 93,2 | 5 | 97 |
| 60 - 69 | 0 | 0 | 29 | 56,5 | 0 | 93,2 | 0 | 97 |
| 70 - 79 | 0 | 0 | 0 | 56,5 | 0 | 93,2 | 0 | 97 |
| 80 - 89 | 0 | 0 | 29 | 85,2 | 0 | 93,2 | 0 | 97 |
| 90 - 99 | 0 | 0 | 0 | 85,2 | 0 | 93,2 | 2 | 99 |
| 100 - 109 | 0 | 0 | 14 | 99 | 0 | 93,2 | 0 | 99 |
| > 110 | 100 | 99 | 0 | 99 | 6 | 99 | 0 | 99 |

Clp = teneur en chlore de l'eau de pluie (en mg/l).
Cln = teneur en chlore de l'eau de la nappe (en mg/l).

Des histogrammes (fig. 20) et des graphiques sur papier de probabilité, nous dégageons les caractéristiques suivantes :

| Clp | 2,5 - 5 mg/l | 5 - 10 mg/l | 10 - 15 mg/l |
|---|---|---|---|
| Mode 1 | 15 | 25 | 35 |
| Mode 2 | 95 | 45 | 65 |
| Mode 3 | » | » | 85 |
| Mode 4 | » | » | 105 |
| Moyenne arithmétique | 21,5 | 32,6 | 67,4 |
| Moyenne graphique prob. | 19 | 27 | 55,5 |
| Médiane | 13 | 20,5 | 63 |
| $\alpha$ 84 | 84 | 41 | 31,5 |
| $\alpha$ 16 | 27 | 13 | 6,5 |
| Ecart type | 28,5 | 14 | 12,5 |

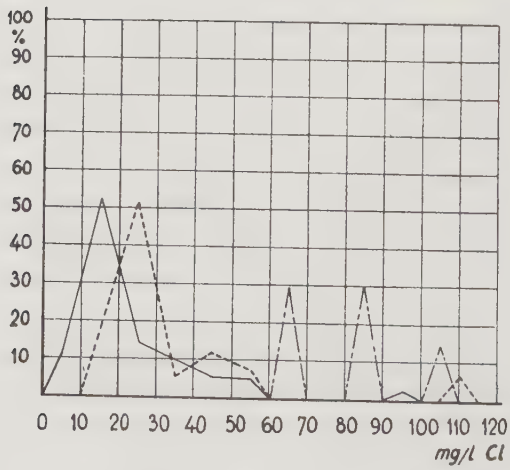



Fig. 20.

Histogramme des concentrations en chlore des puits de la zone Sud, en période de hautes eaux.

Nous pouvons calculer les rapports Cl p/Cl n de chacune des régions comprises entre deux isochlores de l'eau de pluie en prenant pour valeur de Cl p la moyenne des deux isochlores et pour Cl n la moyenne arithmétique. On a alors :

| Clp | Cln | Clp/Cln |
|---|---|---|
| 15 - 10 | 67,4 | 1/5,4 |
| 10 - 5 | 32,6 | 1/4,32 |
| 5 - 2,5 | 21,5 | 1/3,73 |

En prenant pour Cl n la moyenne donnée par le graphique de probabilité, on a :

| Clp | Cln | Clp/Cln |
|---|---|---|
| 15 - 10 | 55,5 | 1/4,4 |
| 10 - 5 | 27 | 1/3,6 |
| 5 - 2,5 | 19 | 1/5,1 |

L'histogramme montre pour les eaux des nappes phréatiques comprises entre les isochlores de pluie 5 - 2,5, un pic dont la base s'étale vers les plus fortes concentrations en chlorures; pour les eaux entre les isochlores de pluie 5 - 10, un second pic, relativement faible pour les concentrations en chlore, comprises entre 35 et 60 mg/l, enfin pour les eaux entre les isochlores de pluie 15 - 10 une série de pics correspondant à Cl n : 35, 65, 85 et 105 mg/l de Cl. La multiplicité de ces derniers pics dépend en partie du nombre relativement restreint des échantillons, mais montre néanmoins la tendance générale.

Tout ceci montre qu'à côté d'un phénomène général, traduit par le pic majeur, se placent des phénomènes accessoires; ils sont traduits par l'étalement asymétrique de la base du pic principal ou par la présence de pics secondaires dans le domaine des eaux plus chargées en chlore.

Nous considérons que le pic majeur (fig. 21) caractérise le phénomène général; ce qui nous amène à examiner la statistique correspondante.

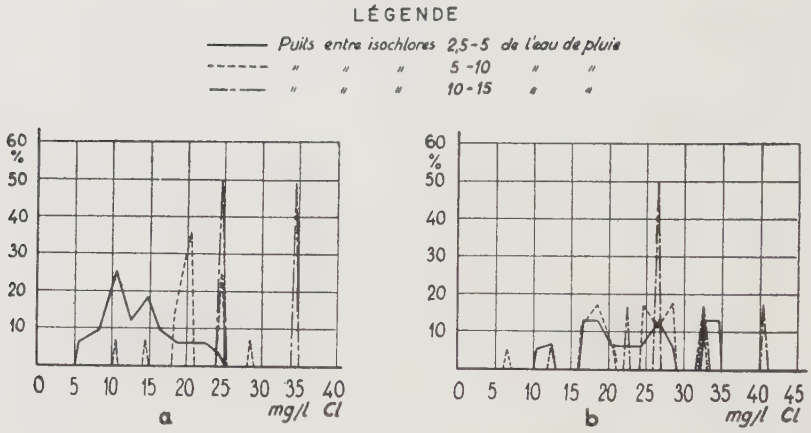



FIG. 21.
Histogrammes des concentrations en chlore de l'eau des puits.
*a* : de la zone Sud; *b* : de la zone Nord et correspondant au pic principal, en période de hautes eaux.

STATISTIQUES PORTANT SUR LE PIC MAJEUR (en % et cumulés).

| Clp ..... | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 14 | | 33 | |
| Cln | en % | % cumulés | en % | % cumulés |
| 6 - 7 | » | » | 6 | 5,9 |
| 8 - 9 | » | » | 9 | 14,8 |
| 10 - 11 | 7 | 6,9 | 25 | 39,6 |
| 12 - 13 | 0 | 6,9 | 12 | 51,5 |
| 14 - 15 | 7 | 13,9 | 18 | 69,2 |
| 16 - 17 | 0 | 13,9 | 9 | 78,1 |
| 18 - 19 | 14 | 27,8 | 6 | 81,1 |
| 20 - 21 | 36 | 63,5 | 6 | 90 |
| 22 - 23 | 0 | 63,5 | 6 | 96 |
| 24 - 25 | 22 | 85 | 3 | 99 |
| 26 - 27 | 0 | 85 | » | » |
| 28 - 29 | 7 | 92 | » | » |
| 30 - 31 | 0 | 92 | » | » |
| 32 - 33 | 0 | 92 | » | » |
| 34 - 35 | 7 | 99 | » | » |

Clp = teneur en chlore de l'eau de pluie (en mg/l).
Cln = teneur en chlore de l'eau de la nappe (en mg/l).

Des histogrammes et des graphiques sur papier de probabilités, nous dégageons les caractéristiques suivantes :

| Clp | 2,5 - 5 mg/l | 5 - 10 mg/l |
|---|---|---|
| Mode 1 | 11 | 21 |
| Mode 2 | 15 | 25 |
| Moyenne arithmétique | 13,8 | 21,6 |
| Moyenne graphique prob. | 13,5 | 20,5 |
| Médiane | 12,5 | 19,5 |
| $\alpha$ 84 | 18,5 | 24,5 |
| $\alpha$ 16 | 8,5 | 16,5 |
| Ecart type | 5 | 4 |

Le dernier histogramme nous montre une série de pics qui se détachent franchement, sauf peut-être pour les eaux entre les isochlores 2,5 - 5 qui présentent deux pics successifs et un troisième dont la base s'étale vers les hautes concentrations en chlorures. A part cela, ces pics sont nets et francs, ce qui traduit un phénomène général. Pour le graphique cumulé sur papier de probabilités, les deux courbes sont également nettes et franches.

Ces derniers résultats serviront donc au calcul du coefficient d'alimentation de la nappe.

### B. — Calcul du coefficient d'alimentation A

Les calculs du coefficient ont été faits de deux manières différentes :

1° D'après les isochlores Cl p et Cl n de la carte du Bassin d'Aquitaine;

2° D'après les données des statistiques.

D'après les courbes isochlores Cl p et Cl n de la carte (fig. 19), la courbe Cl n = 40 coïncide avec la courbe Cl p = 10, d'où

$$A = \frac{Cl\ p}{Cl\ n} = \frac{10}{40} = 1/4.$$

La courbe Cl n = 20 coïncide avec la courbe Cl p = 5, d'où

$$A = \frac{5}{20} = 1/4.$$

La courbe Cl n = 15 coïncide avec la courbe Cl p = 3,75,

d'où $$A = \frac{3,75}{15} = 1/4.$$

La courbe Cl n = 10 coïncide avec la courbe Cl p = 2,5,

d'où $$A = \frac{2,5}{10} = 1/4.$$

D'après ces données, le coefficient d'alimentation serait le même sur toute la région au Sud de la ligne Cazaux-Castel-jaloux, où la hauteur de pluie diminue de l'Ouest à l'Est (fig. 18). Cela paraît improbable. Normalement, le coefficient d'alimentation doit diminuer lorsque les hauteurs de pluie diminuent elles aussi. Le rapport évapo-transpiration/hauteur de pluie croît lorsque la hauteur de pluie décroît (fig. 22).

### C. — Calcul de l'infiltration et de l'évapo-transpiration

En adoptant ce coefficient d'alimentation, nous aurions, selon la pluviométrie, les infiltrations I et les évapo-transpirations E suivantes :

| P (en mm) | I (en mm) | E (en mm) |
|---|---|---|
| 1 000 | 250 | 750 |
| 950 | 238 | 712 |
| 900 | 225 | 675 |
| 850 | 213 | 637 |
| 800 | 200 | 600 |

Nous obtenons ainsi pour E des valeurs trop élevées par rapport à la moyenne attendue, 550 à 560, telle que nous la trouvons dans le travail d'Arlery, Garnier et Langlois (1954).

Ces résultats nous ont amené à nous servir des données statistiques obtenues à partir des pics principaux. Nous avons calculé les rapports Cl p/Cl n de chacune des régions comprises entre deux isochlores de l'eau de pluie, en prenant pour valeur de Cl p la moyenne des deux isochlores et pour Cl n la médiane et en l'absence de médiane, la moyenne arithmétique.

On a alors :

| Clp | Cln | A = Clp/Cln |
|---|---|---|
| 15 - 10 | 29,5 | 1/2,36 |
| 10 - 5 | 19,5 | 1/2,60 |
| 5 - 2,5 | 12,5 | 1/3,33 |

Nous en déduisons par calculs les infiltrations I et l'évapotranspiration E suivantes, le long des isohyètes ou courbes d'égale hauteur de pluie correspondant à tel ou tel coefficient d'alimentation.

| Clp | Cln | P | A | I | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 - 10 | 29,5 | 1 200 | 1/2,36 | 510 | 690 |
| 10 - 5 | 19,5 | 1 000 | 1/2,6 | 385 | 615 |
| 5 - 2,5 | 12,5 | 900 | 1/3,2 | 282 | 618 |
| | | 800 | 1/3,5 | 228 | 572 |

Ces derniers calculs sont plus satisfaisants. E est relativement constant, avec cependant une décroissance générale correspondant à celle des hauteurs de pluie.

Le relation E = f (P) que nous avons observée peut être rapprochée de celle qui a été donnée par Coutagne (1942) (fig. 22).

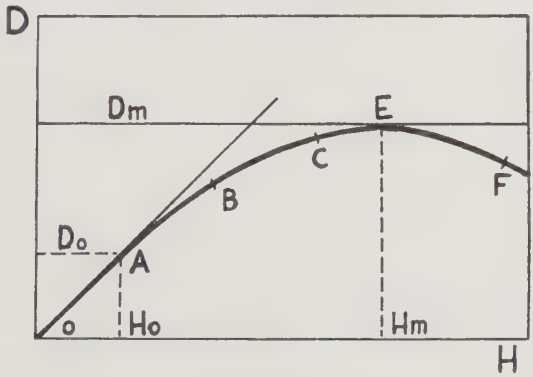



Fig. 22.

Courbe de Coutagne.

D : déficit d'écoulement; H : pluviométrie;
Dm : déficit d'écoulement maximum.

Elle est exprimée par la courbe ci-dessous (fig. 23).

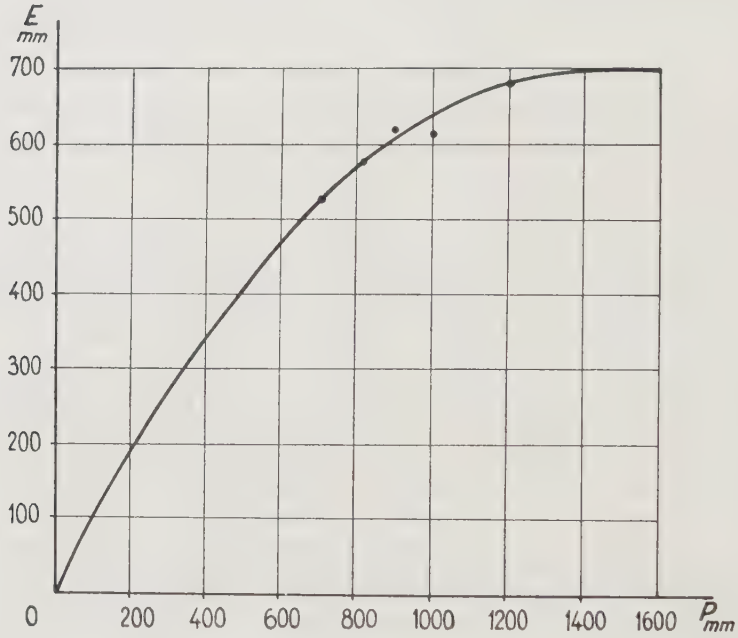



Fig. 23.

Relation entre l'évapo-transpiration E et la pluviométrie P, en période de hautes eaux, de la zone Sud, avec E = 0; P = 0.

Comme nous n'avons pas de ruissellement ou que celui-ci est négligeable, nous égalons le déficit d'écoulement D à l'évapo-transpiration E. Em correspond à la valeur maxima du pouvoir évaporant de l'atmosphère et de la végétation en fonction des conditions climatiques données. Pm est la hauteur de pluie correspondante.

Les régions à précipitations relativement très faibles correspondent à la première portion de la courbe, où l'on doit en principe avoir E = P : toute la pluie est évaporée. Mais si la pluie n'est pas toute évaporée, on a, suivant l'importance des hauteurs de pluie, les relations suivantes :

Les régions à précipitations relativement faibles intéressent la partie supérieure de la courbe, telle que A B où l'on a E = a + b P, assimilant un arc de courbe très tendu à une droite.

Les régions à précipitations moyennes intéressent un arc de courbe A C, moins tendu, pour lequel on peut adopter une expression parabolique : $E = a + b P + c P^2$.

Les régions à précipitations moyennes varient relativement peu de part et d'autre de P, avec pratiquement E = Em = constante.

Les régions à précipitations relativement élevées ont une relation $E = a - b P$. Graphiquement, c'est la relation $E = a + b P + C P^2$, qui correspond le mieux aux valeurs que nous avons obtenues.

Avec si peu de points, nous ne pouvons calculer les paramètres d'une manière exacte. Les courbes qui serrent d'assez près notre courbe sont données par les formules (fig. 24)

*a)* $E = 240 + 0{,}525\ P - 1{,}32 \times 10^{-4}\ P^2$

*b)* $E = 235 + 0{,}5\ P - 10^{-4}\ P^2$

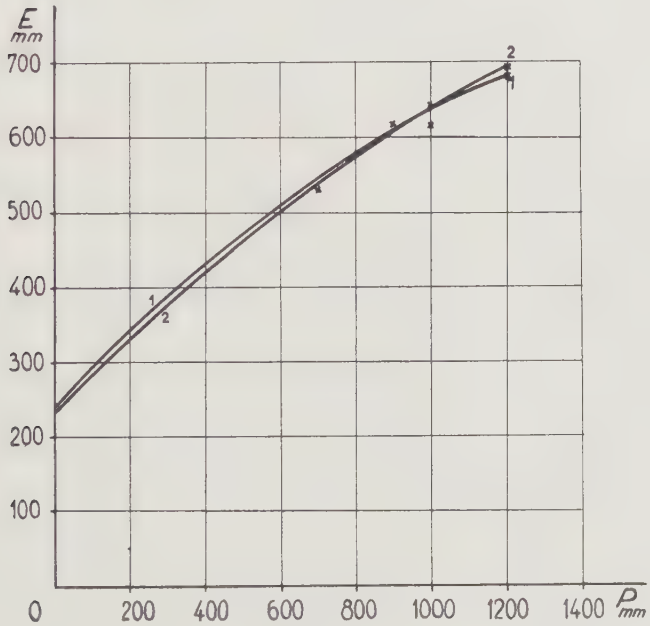



Fig. 24.

Relations entre l'évapo-transpiration (E) et la pluviométrie (P).
1 : $E = 240 + 0{,}525\ P - 1{,}32 \times 10^{-4} P^2$;
2 : $E = 235 + 0{,}5\ P - 10^{-4} P^2$.

qui donnent les valeurs suivantes et les écarts avec E calculés par la méthode du chlore.

| P (en mm) | Formule a | | Formule b | |
|---|---|---|---|---|
| | E (en mm) | Ecart | E (en mm) | Ecart |
| 700 | 542,8 | + 16,8 | 536 | + 10 |
| 800 | 575 | + 3 | 571 | — 1 |
| 900 | 605,6 | — 12,4 | 604 | — 14 |
| 1 000 | 633 | + 18 | 635 | + 20 |
| 1 200 | 680 | — 10 | 691 | + 1 |

On obtient alors pour Pm et Em :

Formule a.... Pm = 2 000 mm Em = 762 mm

Formule b.... Pm = 2 500 mm Em = 850 mm.

Dans ce qui précède, nous n'avons cherché que des expressions relatives à une portion de la courbe $E = f(P)$. En réalité, la relation complète pour toute la pluviométrie depuis $P = 0$, ainsi que l'indique Coutagne, doit avoir pour expression $E = P - d P^2$.

Coutagne a montré que, pour la France, on a, d'une manière générale, $E = P - 4{,}2 \times 10^{-4} P^2$.

La relation que nous établissons d'après les valeurs de E que nous avons calculées est plus convenable sous la forme : $E = P - 3{,}6 \times 10^{-4} P^2$.

En effet, on obtient pour les valeurs de d avec :

| E (en mm) | P (en mm) | d |
|---|---|---|
| 525 | 700 | $3{,}57 \times 10^{-4}$ |
| 572 | 800 | $3{,}56 \times 10^{-4}$ |
| 618 | 900 | $3{,}48 \times 10^{-4}$ |
| 615 | 1 000 | $3{,}85 \times 10^{-4}$ |
| 680 | 1 200 | $3{,}61 \times 10^{-4}$ |

Cette formule nous donne pour les différentes valeurs de P :

| P (en mm) | E (en mm) | Ecarts |
|---|---|---|
| 700 | 524 | — 1 |
| 800 | 569 | — 3 |
| 900 | 609 | — 9 |
| 1 000 | 640 | + 25 |
| 1 200 | 682 | + 2 |

ce qui est relativement acceptable.

On obtient ainsi une courbe qui est tout à fait proche de la courbe expérimentale. Avec ces valeurs, on obtient :

$$Pm = 1\,390 \text{ mm et } Em = 694 \text{ mm.}$$

Cette formule parabolique n'est en réalité qu'une simplification de la formule expérimentale traduisant la fonction $E = f(P)$ pour la partie à partir de laquelle $E < P$. D'après Coutagne $E = Em\, e^{-K^2 (P - Pm)^2}$

Les coefficients Pm, Em et $K^2$ caractérisent le bassin ou la région et dépendent à la fois de ses éléments météorologiques (température, précipitations) et de ses éléments naturels (nature topographique, nature lithologique), c'est-à-dire aussi de la perméabilité. On peut dire que, « grosso modo », Em et Pm croissent avec la température, que K varie d'une façon inverse, que le produit K Pm est à peu près constant, variant entre 1,09 et 1,35. Pour la France, en général, on a :

$$Em = 600 \text{ mm}; \; Pm = 1\,200 \text{ mm}; \; K^2 = 1 \times 10^{-6};$$
$$K = 1 \times 10^{-3}; \; K\,Hm = 1{,}20.$$

Pour le Massif Central :

$$Em = 500 \text{ mm}; \; Pm = 1\,000 \text{ mm}; \; K^2 = 1{,}41 \times 10^{-6};$$
$$K = 1{,}19 \times 10^{-3}; \; K\,Hm = 1{,}19.$$

Si nous introduisons les valeurs de Em et de Pm dans la formule ci-dessus, nous obtenons pour $K^2$ des valeurs très irrégulières et parfois négatives. Par contre, si nous introduisons les valeurs de Em = 0,694 et Pm = 1,390 obtenues à l'aide de la formule parabolique, nous obtenons des valeurs de $K^2$ homogènes.

En voici le tableau :

| E (en mm) | P (en mm) | $K^2$ | K |
|---|---|---|---|
| 680 | 1 200 | $0,635 \times 10^{-6}$ | $0,797 \times 10^{-3}$ |
| 615 | 1 000 | $0,816 \times 10^{-6}$ | $0,902 \times 10^{-3}$ |
| 618 | 900 | $0,489 \times 10^{-6}$ | $0,700 \times 10^{-3}$ |
| 572 | 800 | $0,546 \times 10^{-6}$ | $0,739 \times 10^{-3}$ |
| 529 | 700 | $0,588 \times 10^{-6}$ | $0,765 \times 10^{-3}$ |

En prenant la valeur moyenne de K, $K = 0,780 \times 10^{-3}$, on obtient K Pm = 1,08 qui est relativement satisfaisant. La formule devient alors :

$$E = 694\, e^{-0,608 \times 10^{-6} (P - 1\,390)^2}.$$

Cette formule nous donne, pour les différentes valeurs de P, les valeurs suivantes de E qui ne s'écartent pas beaucoup des valeurs observées.

| P (en mm) | E (en mm) | Ecarts avec les valeurs observées |
|---|---|---|
| 700 | 519 | — 6 |
| 800 | 562 | — 10 |
| 900 | 598 | — 20 |
| 1 000 | 631 | + 16 |
| 1 200 | 678 | — 2 |

Si, au lieu de prendre Em = 694, nous prenions Em = 700, on aurait :

| P (en mm) | E (en mm) | Ecarts |
|---|---|---|
| 700 | 525 | 0 |
| 800 | 568 | — 4 |
| 900 | 604 | — 14 |
| 1 000 | 637 | + 22 |
| 1 200 | 684 | + 4 |

Les valeurs relativement élevées de Pm et de Em, relativement faibles de K, sont dues à la présence de la forêt qui rend l'évapo-transpiration très forte.

## III. — LA ZONE NORD EN PÉRIODE DE HAUTES EAUX

### A. — Statistiques générales des concentrations en chlore

Comme nous l'avons dit, la région est moins simple que la zone Sud. La zone des « Sables des Landes » est bordée vers la Garonne de toute une série de terrasses allant du Quaternaire le plus ancien au Quaternaire le plus récent. Cette bande d'alluvions, faite d'un mélange de galets ou de graviers et de sable, a une largeur de 15 km au N.-E., de 2 à 3 km au S.-E.

Les courbes d'égale hauteur de pluie n'ont plus la même régularité. L'isohyète 800 mm s'étend largement dans tout le Médoc, d'Hourtin à Carcans. Elle longe la Gironde et la Garonne. Au centre, l'isohyète de 900 mm pénètre profondément à l'intérieur des terres (fig. 18).

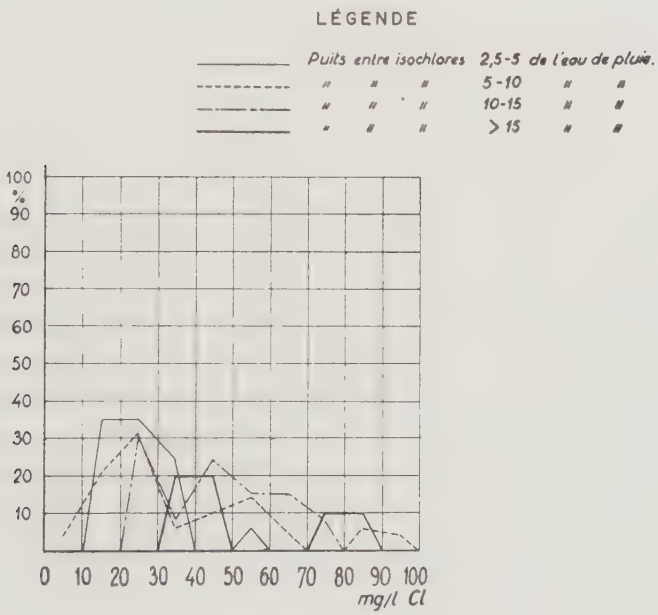



Fig. 25.

Histogramme des concentrations en chlore de l'eau des puits de la zone Nord, en période de crue.

Les isochlores de l'eau de pluie n'ont pu être établies que sur un petit nombre de points (fig. 19), ce qui amène une certaine imprécision dans leur tracé. Cependant, la tendance générale d'une décroissance de la teneur en chlore de l'eau de pluie de l'Océan vers l'intérieur reste très nette, malgré certaines perturbations locales, au voisinage du Bassin d'Arcachon.

Tantôt, comme au N.-W., les isochlores présentent un certain parallélisme avec les isohyètes; tantôt, comme au N.-E., elles les recoupent perpendiculairement.

Dans les statistiques qui vont suivre, nous n'avons pas tenu compte des points d'eau qui se trouvent sur les alluvions; nous ne gardons que les valeurs des points d'eau situés sur les « Sables des Landes », afin que notre étude reste homogène.

Statistiques générales (en % et cumulés)

| Clp..... | > 15 | | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits.. | 10 | | 13 | | 29 | | 17 | |
| Cln..... | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 0 - 9 | » | » | » | » | 4 | 3,9 | 0 | 0 |
| 10 - 19 | » | » | » | » | 21 | 24,7 | 35 | 34,6 |
| 20 - 29 | » | » | 30 | 29,7 | 31 | 55,4 | 35 | 69,3 |
| 30 - 39 | 20 | 19,6 | 8 | 37,6 | 6 | 61,3 | 24 | 93 |
| 40 - 49 | 20 | 39,6 | 24 | 61,4 | 10 | 71,2 | 0 | 93 |
| 50 - 59 | 0 | 39,6 | 15 | 76,2 | 14 | 85,1 | 6 | 99 |
| 60 - 69 | 0 | 39,6 | 15 | 91 | 4 | 89,1 | 0 | 99 |
| 70 - 79 | 10 | 49,5 | 8 | 99 | 0 | 89,1 | 0 | 99 |
| 80 - 89 | 10 | 59,5 | 0 | 99 | 6 | 95 | 0 | 99 |
| 90 - 99 | 0 | 59,5 | 0 | 99 | 4 | 99 | 0 | 99 |
| 100 - 109 | 0 | 59,5 | 0 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| > 110 | 40 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |

Teneurs en chlore (mg/l) Cl p de l'eau de pluie;
Cl n de l'eau de la nappe.

Des histogrammes (fig. 25) et des graphiques sur papier de probabilités, nous obtenons les caractéristiques suivantes :

| Clp (en mg/l) | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 | > 15 |
|---|---|---|---|---|
| Mode 1 | 25 | 25 | 25 | 40 |
| Mode 2 | 55 | 55 | 45 | 80 |
| Mode 3 | » | » | » | 110 |
| Moyenne arithmétique | 25,4 | 36,9 | 43 | 108,9 |
| Moyenne graphique | 19 | 38,5 | 40,5 | 69,75 |
| Médiane | 19,9 | 23,5 | 40,5 | 86 |
| $\alpha$ 84 | 30,5 | 54,5 | 60 | 107 |
| $\alpha$ 16 | 7,5 | 12,5 | 21 | 32,5 |
| Ecart type | 11,5 | 21 | 19,5 | 37,25 |

En prenant la moyenne arithmétique de Cl n (mg/l) et la moyenne de Cl p (mg/l) entre deux isochlores, nous obtenons les rapports Cl p/Cl n :

| Clp | Cln | Clp/Cln |
|---|---|---|
| > 15 | 108,9 | 1/6,1 |
| 15 - 10 | 43 | 1/3,4 |
| 10 - 5 | 36,9 | 1/4,9 |
| 5 - 2,5 | 25,4 | 1/6,7 |

En prenant pour Cl n la moyenne donnée par le graphique de probabilité, nous avons :

| Clp | Cln | Clp/Cln |
|---|---|---|
| > 15 | 69,75 | 1/3,9 |
| 15 - 10 | 40,5 | 1/3,2 |
| 10 - 5 | 38,5 | 1/5,1 |
| 5 - 2,5 | 19 | 1/5,0 |

La multiplicité des modes provient d'une part du nombre trop faible d'échantillons, d'autre part de causes perturbatrices du phénomène général. Nous ne tiendrons donc compte que du pic majeur en le débarrassant des perturbations. La statistique relative (fig. 21) à ce pic donne les résultats suivants :

Statistiques portant sur le pic majeur (en % et cumulés).

| Clp ..... | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 6 | | 18 | | 16 | |
| Cln ..... | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 6 - 7 | » | » | 5 | 4,9 | 0 | 0 |
| 8 - 9 | » | » | 0 | 4,9 | 0 | 0 |
| 10 - 11 | » | » | 0 | 4,9 | 5 | 4,9 |
| 12 - 13 | » | » | 5 | 9,9 | 6 | 10,9 |
| 14 - 15 | » | » | 0 | 9,9 | 0 | 10,9 |
| 16 - 17 | » | » | 11 | 20,8 | 13 | 23,7 |
| 18 - 19 | » | » | 17 | 37,6 | 13 | 36,6 |
| 20 - 21 | » | » | 6 | 43,5 | 6 | 42,5 |
| 22 - 23 | 16 | 15,8 | 0 | 43,5 | 6 | 48,5 |
| 24 - 25 | 0 | 15,8 | 17 | 60,3 | 6 | 54,4 |
| 26 - 27 | 50 | 65,3 | 11 | 71,2 | 13 | 67,3 |
| 28 - 29 | 0 | 65,3 | 17 | 88,1 | 6 | 73,2 |
| 30 - 31 | 0 | 65,3 | 0 | 88,1 | 0 | 73,2 |
| 32 - 33 | 16 | 81,1 | 11 | 99 | 13 | 86,1 |
| 34 - 35 | 0 | 81,1 | » | » | 13 | 99 |
| 36 - 37 | 0 | 81,1 | » | » | » | » |
| 38 - 39 | 0 | 81,1 | » | » | » | » |
| 40 - 41 | 18 | 99 | » | » | » | » |

Teneurs en chlore (mg/l) Cl p de l'eau de pluie;
Cl n de l'eau de la nappe.

En voici les caractéristiques :

| Clp (mg/l) | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 |
|---|---|---|---|
| Mode 1 | 17,5 | 18,5 | 26,5 |
| Mode 2 | 26,5 | 24,5 | 40,5 |
| Mode 3 | 33,5 | 28,5 | 22,5 |
| Mode 4 | » | 32,5 | 32,5 |
| Moyenne arithmétique | 23,3 | 22,5 | 29 |
| Moyenne graphique | 23,8 | 22 | 31,7 |
| Médiane | 23,4 | 23,5 | 26 |
| $\alpha$ 84 | 32,1 | 28 | 38,9 |
| $\alpha$ 16 | 15,5 | 16 | 24,5 |
| Ecart type | 8,3 | 6 | 7,2 |

Le dernier histogramme nous montre que les pics sont nets, surtout pour les eaux dont les isochlores sont compris entre 10 et 15 mg/l. Pour les autres eaux, ils sont plus ou moins nets. Malgré ces légères discordances, l'histogramme montre bien la tendance générale. Aussi prendrons-nous ces dernières valeurs pour calculer le coefficient d'alimentation, l'évapo-transpiration et l'infiltration.

### B. — Calcul du coefficient d'alimentation A = Cl p/Cl n, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration

Nous calculons le coefficient A = Cl p/Cl n d'après les données statistiques.

Pour Cl p, nous prendrons la moyenne entre les deux courbes; pour Cl n, la moyenne arithmétique ou la médiane. L'infiltration est alors égale à I = P × A et l'évapo-transpiration à E = P — I.

Nous obtenons alors les valeurs suivantes :

| Clp (en mg/l) | 15 - 10 | 10 - 5 | 5 - 2,5 |
|---|---|---|---|
| Cln (en mg/l) | 29 | 22,5 | 23 - 20 (1) |
| A | 1/2,33 | 1/2,99 | 1/5,5 - 1/4,76 |
| P (en mm) | 850 | 900 | 850 |
| I (en mm) | 365 | 301 | 153 - 178 |
| E (en mm) | 485 | 599 | 697 - 672 |

(1) On peut également admettre pour Cl n la valeur de 20 mg/l si l'on supprime les valeurs supérieures à 31 mg/l, comme le suggère l'histogramme.

Le coefficient d'alimentation décroît très nettement de l'Ouest à l'Est, de 1/2,33 au bord de l'Océan à 1/5,5 à l'intérieur du pays. Au contraire, l'évapo-transpiration augmente de l'Ouest à l'Est. On passe successivement de 485 à 672. C'est à quoi l'on doit s'attendre *(cf.* la remarque de la page 130).

### *Méthode du chlore et méthode de Thornthwaite pour quelques points précis* (M. Schœller, 1961)

L'évapo-transpiration réelle peut être calculée à l'aide de données météorologiques par la méthode de Thornthwaite. il est donc intéressant de confronter les valeurs obtenues par cette méthode, à celles que nous donne la méthode du chlore.

Arlery, Garnier et Langlois (1954) avaient calculé l'évapo-transpiration potentielle et l'évapo-transpiration réelle de quelques stations au voisinage de la région étudiée : Bordeaux-Floirac, Angoulême, Agen et Pau. En utilisant les données climatologiques publiées par Sanson (1945), nous les avons calculées pour Arcachon, Cazaux, Mont-de-Marsan, Dax, Bordeaux (alt. 47) (tableaux XVI, XVII et XVIII), en suivant les processus indiqués par Arlery, Garnier et Langlois.

Les résultats sont exprimés dans le tableau ci-dessous :

| | Er | Ep | P | Ep - Er | P - Er = I | P - Ep |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bordeaux-Floirac. | 588 | 712 | 787 | 124 | 199 | 75 |
| Angoulême..... | 603 | 715 | 804 | 112 | 201 | 89 |
| Agen..... | 525 | 710 | 586 | 185 | 61 | — 124 |
| Pau..... | 688 | 704 | 1 090 | 16 | 402 | 386 |
| Bordeaux, alt. 47. | 589,2 | 724,7 | 833 | 135,5 | 243,8 | 108,3 |
| Arcachon..... | 618,7 | 753,1 | 874 | 134 | 255,3 | 120,9 |
| Cazaux..... | 595,6 | 712,1 | 881 | 116,5 | 285,4 | 168,9 |
| Mont-de-Marsan.. | 648,2 | 747,3 | 930 | 99,1 | 281,8 | 182,7 |
| Dax..... | 723,7 | 740,5 | 1 233 | 16,8 | 509,3 | 492,5 |

Er : évapo-transpiration réelle; Ep : évapo-transpiration potentielle; P : précipitation; Ep - Er : manque d'eau; P - Er = I : excès d'eau. — Toutes ces valeurs sont exprimées en mm.

Nous avons appliqué la méthode des chlorures à Bordeaux-Mérignac, Arcachon et Mont-de-Marsan. Autour de chacune de ces stations, nous avions un grand nombre de puits qui nous ont permis d'obtenir la valeur de Cl n.

Les résultats obtenus sont les suivants : nous avons placé à côté les résultats donnés par la méthode de Thornthwaite.

| | Clp | Cln | A | P | I | E | Ert |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bordeaux-Mérignac.. | 6 | 19,9 | 1/3,31 | 833 | 251 | 582 | 589,2 |
| Arcachon..... | 12 | 41,4 | 1/3,45 | 874 | 253 | 621 | 618 |
| Mont-de-Marsan..... | 4,1 | 12,5 | 1/3,28 | 930 | 283 | 647 | 648,2 |

Evapo-transpiration calculée :
E : avec la méthode du Cl;
Ert : avec la méthode de Thornthwaite.

Nous voyons la bonne concordance entre les deux séries de résultats.

Le tableau de la p. 142 nous montre que l'évapo-transpiration potentielle reste pratiquement constante dans la partie du Bassin d'Aquitaine qui nous occupe. Par contre, l'évapo-transpiration réelle est assez variable. En certains endroits, elle peut être voisine de l'évapo-transpiration potentielle. C'est le cas de la région de Dax et de Pau, où les hauteurs de pluie sont élevées. Il y a plus d'eau de pluie que n'en demande la végétation. Les excès d'eau, i.e., les hauteurs d'eau d'infiltration sont importants. L'évapo-transpiration réelle peut aussi s'approcher de l'évapo-transpiration potentielle lorsque les végétaux, en particulier ceux à feuilles persistantes, comme les pins, puisent constamment de l'eau dans la nappe.

En d'autres points, lorsque la nappe est très en-dessous du niveau des racines, la différence entre l'évapo-transpiration potentielle et l'évapo-transpiration réelle s'accroît. Connaissant Cl p et donnant à E la valeur de l'évapo-transpiration potentielle, on peut alors calculer le coefficient d'alimentation et la teneur en Cl de l'eau de la nappe. On obtient :

| | Ep | Clp | A' | Cln |
|---|---|---|---|---|
| Bordeaux..... | 724,7 | 6 | 1/7,65 | 45,9 |
| Arcachon..... | 753,1 | 12 | 1/7,22 | 207 |
| Cazaux..... | 712,1 | (15) | 1/5,25 | (79) |
| Mont-de-Marsan..... | 747,3 | 4,1 | 1/5,09 | 20,9 |
| Dax..... | 740,5 | (7) | 1/2,51 | (17,5) |
| Pau..... | 704 | (3,5) | 1/2,82 | ( 9,9) |

Les valeurs entre parenthèses de Cl p sont approximatives. Les valeurs de Cl n ainsi obtenues correspondent aux valeurs moyennement élevées de la région des Landes et peuvent provenir de la forte évapo-transpiration de la forêt. Sans forêt, le coefficient d'alimentation serait augmenté.

## IV. — LA ZONE SUD EN PÉRIODE D'ÉTIAGE (fig. 26)

Nous avons repris nos calculs à l'étiage au moment où la pluviosité est plus faible et où le niveau des nappes est au plus bas, en septembre et en octobre. Nous comparerons ensuite les résultats à ceux de la période de crue.

### A. — Statistiques générales des concentrations en chlore (fig. 27)

La statistique obtenue est la suivante :

Statistiques générales (en % et cumulés).

| Clp (mg/l) . . | > 15 | | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 1 | | 9 | | 17 | | 40 | |
| Cln (mg/l) . . | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 0 - 9 | » | » | 0 | 0 | 6 | 5,9 | 28 | 27,7 |
| 10 - 19 | » | » | 0 | 0 | 53 | 58,9 | 45 | 72,4 |
| 20 - 29 | » | » | 34 | 33,6 | 23 | 81 | 10 | 82 |
| 30 - 39 | » | » | 22 | 55,4 | 12 | 93 | 10 | 92 |
| 40 - 49 | » | » | 0 | 55,4 | 0 | 93 | 5 | 97 |
| 50 - 59 | » | » | 0 | 55,4 | 0 | 93 | 2 | 99 |
| 60 - 69 | » | » | 11 | 66,4 | 0 | 93 | 0 | 99 |
| 70 - 79 | » | » | 11 | 77,2 | 6 | 99 | 0 | 99 |
| 80 - 89 | » | » | 11 | 88,1 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| 90 - 99 | » | » | 11 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| 100 - 109 | 100 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| > 110 | » | » | 0 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |

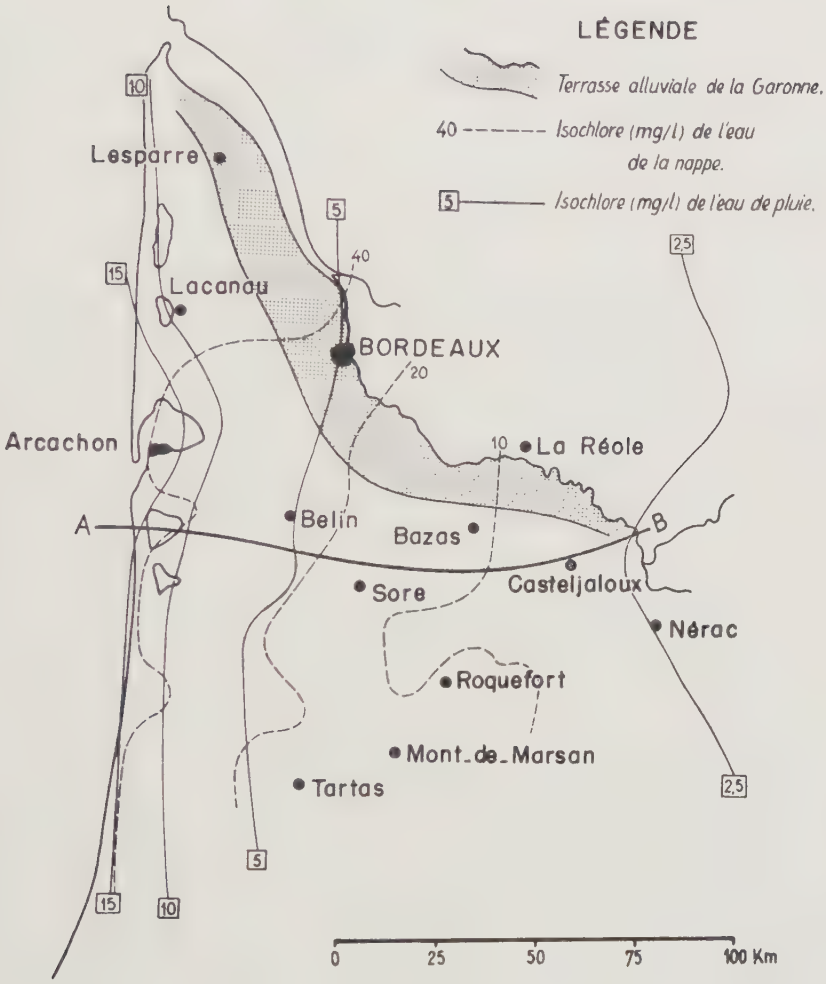



Fig. 26.

Isochlores de l'eau de la nappe en période d'étiage.

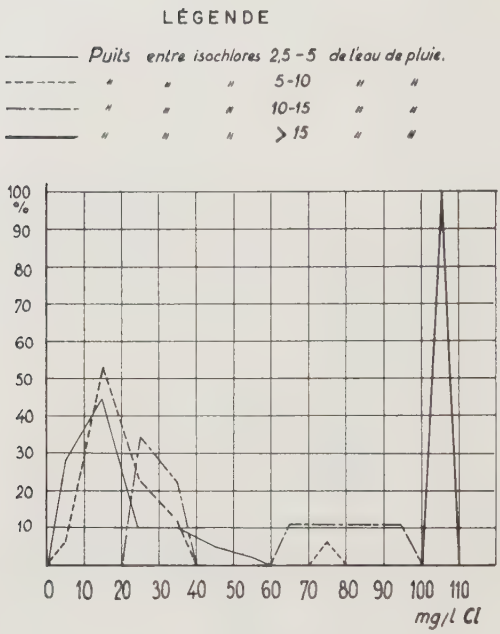



Fig. 27.

Histogramme des concentrations en chlore de l'eau des puits de la zone Sud en période d'étiage.

Des histogrammes et des graphiques sur papier de probabilité, nous tirons les résultats suivants :

| Clp (mg/l) | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 |
|---|---|---|---|
| Mode 1 | 15 | 15 | 25 |
| Mode 2 | » | 75 | » |
| Moyenne arithmétique | 16,9 | 22,1 | 51,3 |
| Moyenne graphique | » | 17,5 | 48,2 |
| Médiane | 8,5 | 14 | 33,5 |
| $\alpha$ 84 | 26,5 | 27 | 81 |
| $\alpha$ 16 | » | 8,1 | 15,5 |
| Ecart type | » | 9,4 | 32,7 |
| Clp/Cln | 1/4,5 | 1/2,8 | 1/4,1 |

Les moyennes sont un peu plus faibles que pendant la période hiver-printemps :

| Clp (mg/l) | Cln (mg/l) | | |
|---|---|---|---|
| | Hiver-Printemps | Automne | Rapport |
| 15 - 10 | 67,4 | 51,3 | 1,31 |
| 10 - 5 | 32,6 | 21,1 | 1,51 |
| 5 - 2,5 | 21,5 | 16,9 | 1,27 |

Comme précédemment, nous n'avons utilisé que les pics majeurs, celui de Cl p 2,5 - 5, qui s'étale de 0 à 30 mg/l; celui de Cl p 5 - 10, compris entre 0 et 40, et celui de Cl p 10 - 15, entre 20 et 40 mg/l.

La statistique (fig. 28) qui correspond à ces pics majeurs donne les chiffres suivants :

Statistiques portant sur le pic majeur (en % et cumulés).

| Clp (mg/l) ..... | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 5 | | 16 | | 35 | |
| Cln (mg/l) | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 4 - 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8,9 |
| 6 - 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 17,6 |
| 8 - 9 | 0 | 0 | 6 | 5,9 | 14 | 31,6 |
| 10 - 11 | 0 | 0 | 6 | 11,9 | 20 | 51,5 |
| 12 - 13 | 0 | 0 | 19 | 30,7 | 5 | 56,4 |
| 14 - 15 | 0 | 0 | 6 | 36,8 | 14 | 70,2 |
| 16 - 17 | 0 | 0 | 13 | 49,5 | 9 | 79,4 |
| 18 - 19 | 0 | 0 | 13 | 62,4 | 3 | 82,4 |
| 20 - 21 | 20 | 19,3 | 6 | 68,4 | 0 | 82,4 |
| 22 - 23 | 0 | 19,3 | 0 | 68,4 | 3 | 85 |
| 24 - 25 | 0 | 19,3 | 6 | 74,2 | 9 | 94 |
| 26 - 27 | 0 | 19,3 | 6 | 80,1 | 0 | 94 |
| 28 - 29 | 40 | 59,4 | 6 | 86 | 0 | 94 |
| 30 - 31 | 0 | 59,4 | 13 | 99 | 5 | 99 |
| 32 - 33 | 0 | 59,4 | » | » | » | » |
| 34 - 35 | 0 | 59,4 | » | » | » | » |
| 36 - 37 | 40 | 99 | » | » | » | » |

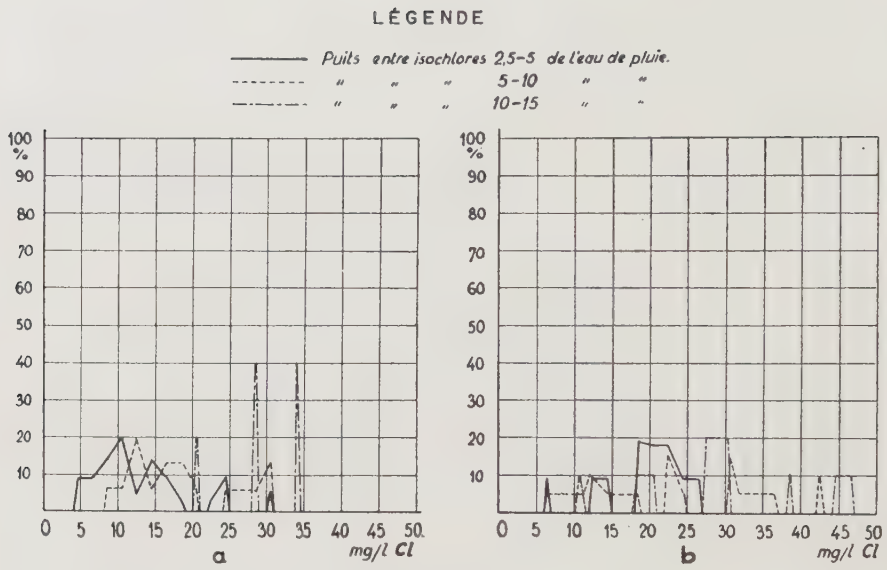



FIG. 28.

Histogrammes des concentrations en chlore de l'eau des puits. a : de la zone Sud; b : de la zone Nord et correspondant au pic principal, en période d'étiage.

Nous en retirons les caractéristiques suivantes :

| Clp (mg/l) | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 |
|---|---|---|---|
| Mode 1 | 11 | 13 | 29 |
| Mode 2 | 15 | 31 | 21 |
| Moyenne arithmétique | 13,5 | 18,6 | 30,2 |
| Moyenne graphique | 14,2 | 19,5 | 27,75 |
| Médiane | 10,5 | 16,5 | 28,5 |
| $\alpha$ 84 | 22 | 28 | 35,5 |
| $\alpha$ 16 | 6,5 | 11 | 20 |
| Ecart type | 7,75 | 8,5 | 7,75 |

### B. — Calcul du coefficient d'alimentation, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration

Les calculs du coefficient d'alimentation A, de l'infiltration $I = P \times A$ et de l'évapo-transpiration $E = P - I$, ont donné les résultats suivants :

| Clp (en mg/l) | Cln (en mg/l | P (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 - 10 | 30,2 | 1 200 | 1/2,41 | 497 | 703 |
| 10 - 5 | 18,6 | 1 000 | 1/2,48 | 402 | 598 |
| 5 - 2,5 | 13,5 | 900 | 1/3,5 | 257 | 643 |
| » | » | 800 | 1/3,8 | 211 | 589 |

La relation entre E et P peut s'exprimer par :

$$E = 25 + 365\ P - 0{,}152\ P^2.$$

Si maintenant nous comparons les valeurs de l'évapo-transpiration calculées, aux données de l'automne et du printemps, nous ne trouvons que de très faibles différences :

| Clp | E (printemps) | E (automne) |
|---|---|---|
| 15 - 10 | 0,42 | 0,41 |
| 10 - 5 | 0,38 | 0,40 |
| 5 - 2,5 | 0,30 | 0,27 |

Cette constance des valeurs est intéressante : elle permet de calculer l'évapo-transpiration avec les données relevées à un moment quelconque de l'année.

## V. — LA ZONE NORD EN PÉRIODE D'ÉTIAGE

### A. — Statistiques générales des concentrations en chlore (fig. 29)

Les statistiques donnent pour la zone Nord les éléments suivants :

Statistiques générales (en % et cumulés).

| Clp (mg/l).. | > 15 | | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 3 | | 10 | | 23 | | 12 | |
| Cln (mg/l) | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 0 - 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8,9 | 9 | 8,9 |
| 10 - 19 | 33 | 32,6 | 20 | 19,6 | 26 | 34,4 | 32 | 40,2 |
| 20 - 29 | 0 | 32,6 | 30 | 49 | 18 | 52 | 50 | 90 |
| 30 - 39 | 0 | 32,6 | 30 | 79 | 26 | 78 | 0 | 90 |
| 40 - 49 | 0 | 32,6 | 20 | 99 | 9 | 87 | 9 | 99 |
| 50 - 59 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 4 | 91 | 0 | 99 |
| 60 - 69 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 4 | 95 | 0 | 99 |
| 70 - 79 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 0 | 95 | 0 | 99 |
| 80 - 89 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 0 | 95 | 0 | 99 |
| 90 - 99 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 0 | 95 | 0 | 99 |
| 100 - 109 | 0 | 32,6 | 0 | 99 | 0 | 95 | 0 | 99 |
| > 110 | 67 | 99 | 0 | 99 | 4 | 99 | 0 | 99 |

| Clp (mg/l)..... | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 | > 15 |
|---|---|---|---|---|
| Mode 1..... | 25 | 15 | 30 | 110 |
| Mode 2..... | 45 | 35 | » | 15 |
| Moyenne arithmétique..... | 20,9 | 30,2 | 29,7 | 89 |
| Moyenne graphique..... | 15,5 | 24,8 | 25,2 | » |
| Médiane..... | 16,5 | 24 | 25,5 | 106 |
| α 84..... | 23,1 | 41 | 36,5 | 107,5 |
| α 16..... | 7,9 | 8,5 | 13,9 | » |
| Ecart type..... | 7,6 | 16,2 | 12,4 | » |
| Clp/Cln (moyenne)..... | 1/5,57 | 1/4,02 | 1/2,38 | » |

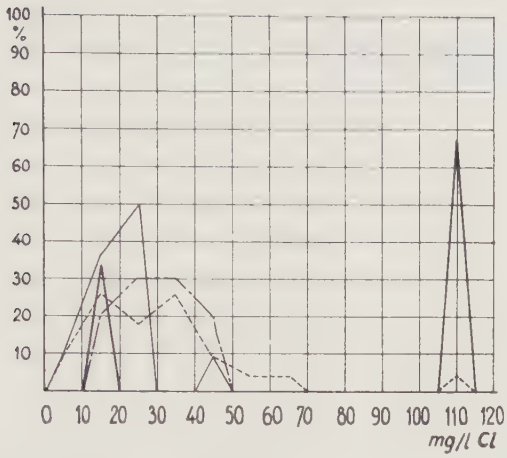



Fig. 29.

Histogramme des concentrations en chlore de l'eau des puits de la zone Nord en période d'étiage.

Les moyennes sont un peu plus faibles que pendant la période hiver-printemps. Nous avons en effet :

| Clp (mg/l) | Cln (mg/l) | | |
|---|---|---|---|
| | Hiver-Printemps | Septembre | Rapport |
| > 15 | 108,9 | 89 | 1,22 |
| 15 - 10 | 43 | 29,7 | 1,45 |
| 10 - 5 | 36,9 | 30,2 | 1,22 |
| 5 - 2,5 | 25,4 | 20,9 | 1,21 |

STATISTIQUES PORTANT SUR LE PIC MAJEUR (en % et cumulés) (fig. 28)

| Clp (mg/l) . . | > 15 | | 15 - 10 | | 10 - 5 | | 5 - 2,5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de puits. | 1 | | 10 | | 20 | | 11 | |
| Cln (mg/l) | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés | en % | en % cumulés |
| 6 - 7 | » | » | 0 | 0 | 5 | 4,9 | 9 | 9 |
| 8 - 9 | » | » | 0 | 0 | 5 | 9,9 | 0 | 9 |
| 10 - 11 | » | » | 10 | 9,9 | 5 | 14,8 | 0 | 9 |
| 12 - 13 | » | » | 0 | 9,9 | 10 | 24,8 | 9 | 18 |
| 14 - 15 | » | » | 0 | 9,9 | 5 | 29,7 | 9 | 27 |
| 16 - 17 | 100 | 99 | 0 | 9,9 | 5 | 34,7 | 0 | 27 |
| 18 - 19 | » | » | 10 | 19,8 | 5 | 39,6 | 19 | 45 |
| 20 - 21 | » | » | 10 | 29,5 | 0 | 39,6 | 18 | 63,2 |
| 22 - 23 | » | » | 0 | 29,5 | 15 | 54,5 | 18 | 81 |
| 24 - 25 | » | » | 0 | 29,5 | 5 | 59,4 | 9 | 90 |
| 26 - 27 | » | » | 0 | 29,5 | 0 | 59,4 | 9 | 99 |
| 28 - 29 | » | » | 20 | 49 | 0 | 59,4 | 0 | 99 |
| 30 - 31 | » | » | 20 | 69,2 | 15 | 74,2 | 0 | 99 |
| 32 - 33 | » | » | 0 | 69,2 | 5 | 79,2 | 0 | 99 |
| 34 - 35 | » | » | 0 | 69,2 | 5 | 84,2 | 0 | 99 |
| 36 - 37 | » | » | 0 | 69,2 | 5 | 89 | 0 | 99 |
| 38 - 39 | » | » | 10 | 79,2 | 0 | 89 | 0 | 99 |
| 40 - 41 | » | » | 0 | 79,2 | 0 | 89 | 0 | 99 |
| 42 - 43 | » | » | 0 | 79,2 | 10 | 99 | 0 | 99 |
| 44 - 45 | » | » | 10 | 89 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| 46 - 47 | » | » | 10 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |
| 48 - 49 | » | » | 0 | 99 | 0 | 99 | 0 | 99 |

| Clp (mg/l) | 2,5 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 |
|---|---|---|---|
| Mode | 14 | 13 | 30 |
| Moyenne arithmétique | 18,7 | 23,8 | 29,7 |
| Moyenne graphique | 17,5 | 22,5 | 30,7 |
| Médiane | 19 | 22,5 | 28,9 |
| $\alpha$ 84 | 23 | 34 | 43,5 |
| $\alpha$ 16 | 12,1 | 11 | 18 |
| Ecart type | 5,45 | 11,5 | 12,75 |

### B. — Calcul du coefficient d'alimentation, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration

Les calculs de A, de I = P × A et de E = P — I, ont donné les valeurs suivantes, le long des isochlores indiquées sur la carte (fig. 26).

| Clp (en mg/l) | Cln (en mg/l) | P (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 - 10 | 29,7 | 850 | 1/2,38 | 357 | 493 |
| 10 - 5 | 23,8 | 900 | 1/3,17 | 284 | 616 |
| 5 - 2,5 | 18,7 | 850 | 1/4,45 | 191 | 659 |

La comparaison de E avec la période précédente :

| Clp (en mg/l) | Hiver-Printemps | Septembre |
|---|---|---|
| 15 - 10 | 485 | 493 |
| 10 - 5 | 599 | 616 |
| 5 - 2,5 | 672 | 659 |

montre que, comme pour la zone Sud, il n'y a que peu de changements entre les deux périodes.

### C. — Le chlore de l'eau des rivières, le coefficient d'alimentation des nappes et l'évapo-transpiration

Les rivières des Landes débitent essentiellement l'eau des nappes, car le ruissellement est négligeable au cours de l'année. En hiver et au début du printemps, elles écoulent l'eau hypodermique. Mais en été et en automne, elles ne font que drainer l'eau des nappes. Elles donnent donc une moyenne de la composition chimique de l'eau des nappes qui s'étendent sur des surfaces relativement grandes et elles permettent de donner ainsi une moyenne de la teneur en chlore de l'eau de ces nappes; nous pouvons dès lors calculer le coefficient d'alimentation et l'évapo-transpiration sur une assez grande échelle.

Le système de drainage des Landes comprend, de l'Est à l'Ouest (fig. 30) :

1° Le Ciron, qui draine la partie orientale de la région des « Sables des Landes » ; en bien des endroits, le Ciron a creusé son lit jusqu'à l'Aquitanien et le Burdigalien; mais même si le Ciron peut être alimenté par les nappes de ces terrains, il est manifeste que l'eau récoltée par la rivière provient en définitive des « Sables des Landes » ; elle a été drainée par l'Aquitanien et le Burdigalien qui, dans la vallée du Ciron, ne possèdent que des affleurements restreints;

2° L'Eyre, qui se jette dans le Bassin d'Arcachon et se subdivise en amont en Grande et en Petite Eyre. Cette rivière ne draine que les « Sables des Landes » si l'on fait abstraction du petit affleurement d'Helvétien à Salles, dans la partie tout à fait aval.

3° Les rivières côtières, perpendiculaires au cours de l'Eyre et qui drainent toute la bande côtière des Landes. Ces rivières se jettent dans des lacs : lacs de Saint-Julien, d'Aureilhan, de Biscarrosse et Parentis, de Cazaux et de Sanguinet, qui ne sont d'ailleurs que d'anciens estuaires flandriens barrés par les dunes.

Les teneurs en chlore, exprimées en mg/l, de l'eau de ces rivières ont été les suivantes :

*Le Ciron, le 3 septembre 1961 :*

| | |
|---|---|
| Pont, N 113 | 15 |
| Villandraut, pont ville | 15 |
| Beaulac | 13 |
| Castelnau, pont D 10 | 11 |

*L'Eyre, 4 septembre 1961 :*

| | |
|---|---|
| Mios, pont GC 3 E | 16 |
| Belin, pont N 132 | 16 |
| Saugnac, pont Vo | 15 |
| Moustey, pont GC 20 E | 15 |
| Commensacq, pont GC 45 | 17 |

*La petite Eyre :*

| | |
|---|---|
| Moustey, pont GC 20 E | 15 |
| Sore, pont N 651 | 15 |

*Ruisseaux côtiers, 4 septembre 1961 :*

Saint-Julien-en-Born :

| | |
|---|---|
| Le Vignac, pont N 652 | 20 |

Ruisseau de Mézos, pont N 652 ..... 19
Saint-Paul-en-Born :
L'Escource, près de l'Eglise, route d'Escource. 19
Ruisseau Bourricos, pont N 652 ..... 20
Parentis :
Ruisseau des Forges, pont N 652 ..... 21

*Lacs, 4 septembre 1961 :*
Lacs de Parentis, à l'embarcadère ..... 33
Etang de Cazaux, à Ispe ..... 37

On constate d'abord que la teneur en chlore de l'eau du Ciron et de l'Eyre, dont le cours est sensiblement parallèle à la côte, varie très peu de l'amont à l'aval, ce qui montre l'homogénéité des formations aquifères.

On constate ensuite une nette augmentation de la teneur en chlore de l'eau des cours d'eau de l'intérieur vers la mer. C'est ce que nous avions observé pour l'eau des puits. Ainsi, la teneur en Cl de l'eau du Ciron est de 11 à 15 mg/l, celle de la Petite Eyre de 15, de la Grande Eyre de 15 à 17, des ruisseaux côtiers de 19 à 21 mg/l.

Les nappes que les rivières drainent se trouvent évidemment en majorité dans les zones amont de ces rivières et de leurs affluents. Nous devons tenir compte de cela pour la comparaison du Cl de l'eau des nappes et de l'eau des rivières.

Le cours amont du Ciron, dont l'eau a une teneur de 11 mg/l à Castelnau et de 13 mg/l à Beaulac, coïncide avec les nappes ayant précisément des concentrations en chlore de 11 mg en amont à 15 mg en aval. Le cours aval, dont l'eau a une teneur en chlore de 15 mg/l, coïncide avec les régions ayant 15 mg de chlore en amont, à 17-18 mg en aval.

La Petite Eyre, dont l'eau a 15 mg/l de Cl, draine les nappes dont la teneur en Cl est de 15 à 17 mg/l.

La Grande Eyre, dont l'eau a 15 à 16 mg/l, draine les nappes dont la teneur en Cl est au voisinage de 16 à 17 mg/l.

Les ruisseaux côtiers, dont la teneur en Cl est de 19 à 21 mg/l, drainent précisément dans leur région amont les nappes dont la teneur moyenne en Cl est de 20 mg/l.

La teneur en chlore de l'eau des rivières, puisque celles-ci écoulent l'eau des nappes, devrait nous permettre de calculer le coefficient et le module d'alimentation des nappes et l'évapotranspiration en utilisant la teneur moyenne annuelle du chlore de l'eau de pluie. Cela est, en effet, possible dans une région aussi homogène que les Landes, au point de vue géolo-

gique, géographique et végétal. La difficulté réside ici dans la grande variation de la teneur en chlore de l'eau de pluie, suivant l'éloignement de la côte.

Dans un bassin fluvial couvrant ainsi plusieurs isochlores de l'eau de pluie, nous ne pouvons atteindre une approximation aussi grande qu'avec l'étude des nappes.

Néanmoins, nous pouvons donner les chiffres suivants :

*Ciron.* — Avec Cl p = 2,6 à 2,5 mg/l; Cl n = 12 mg/l; P = 850 mm, on obtient : A = 1/4,6; I = 185 mm; E = 665 mm.

*Petite Eyre.* — Avec Cl p = 4; Cl n = 15; P $\approx$ 950, on a : A = 1/3,75; I = 253; E = 697.

*Grande Eyre.* — Avec Cl p = 4; Cl n = 15; P $\approx$ 1 000, on a : A = 1/3,75; I = 266; E = 734.

*Bassins côtiers.* — Avec Cl p = 7; Cl n = 20; P $\approx$ 1 150 à 1 200, on a : A = 1/2,85; I = 404; E = 746.

Les valeurs de l'évapo-transpiration devraient être les mêmes que celles qui sont calculées à l'aide de l'étude des nappes. Pour les bassins côtiers, elles semblent normales. Cependant, pour le Ciron et les deux Eyres, elles paraissent un peu trop élevées. Cela pourrait être dû à ce que l'eau des nappes, en période d'étiage, a une teneur plus élevée en Cl; les rivières drainent alors des tranches d'eau de plus en plus profondes.

Il est à remarquer que l'évapo-transpiration, avec la méthode du chlore des eaux superficielles, augmente de l'Est à l'Ouest, ce qui est anormal. L'étude à l'aide du chlore des nappes nous donnait une diminution à laquelle on pouvait s'attendre. Les calculs de l'évapo-transpiration et de l'infiltration à l'aide du chlore de l'eau des rivières sont donc discutables, du moins dans les cas semblables à ceux du Ciron et de l'Eyre.

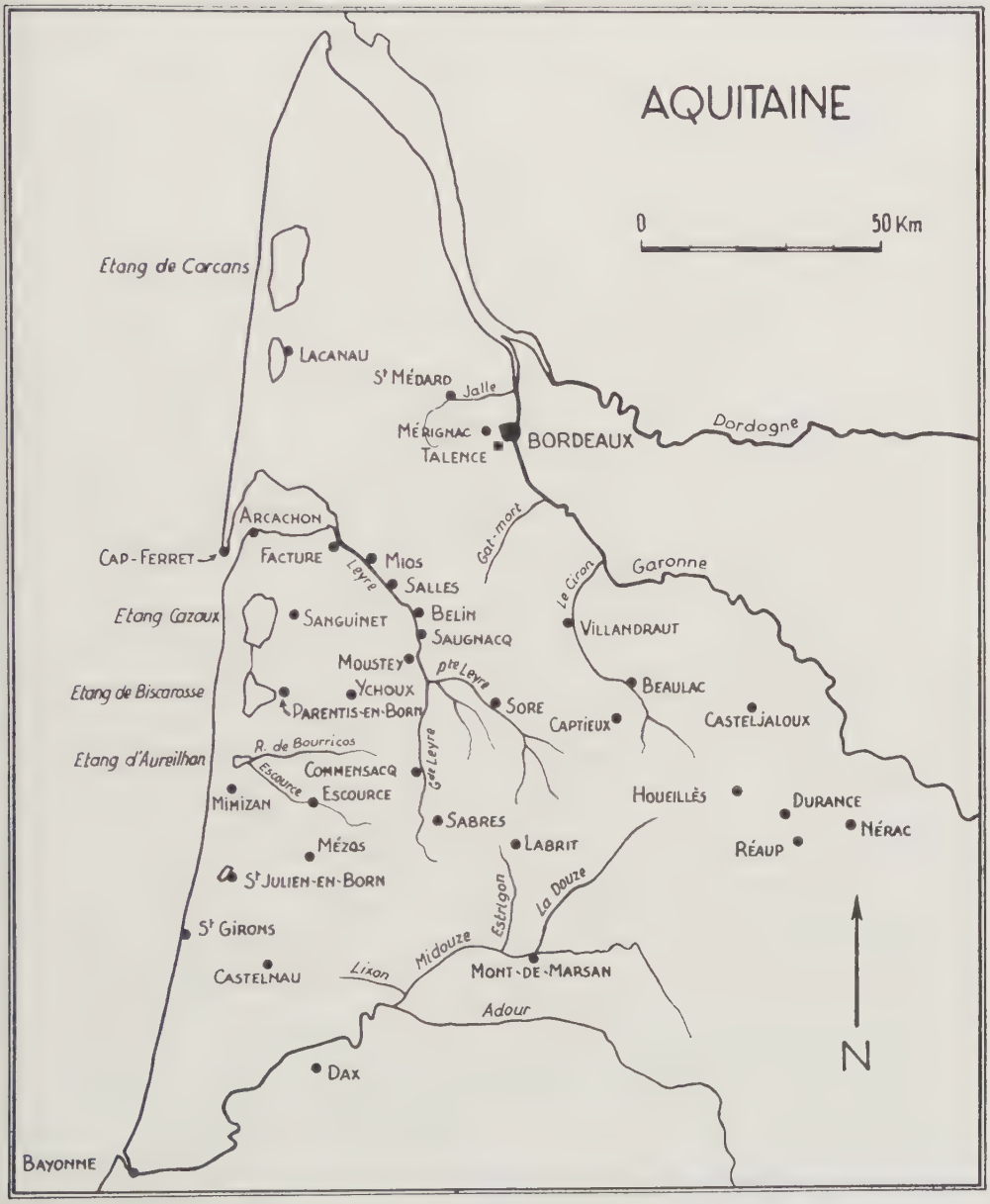

AQUITAINE
0
50 Km
Etang de Carcans
LACANAU
St MÉDARD
Jalle
MÉRIGNAC
TALENCE
BORDEAUX
Dordogne
ARCACHON
CAP-FERRET
FACTURE
Leyre
MIOS
SALLES
Gat-mort
Le Ciron
Garonne
Etang Cazaux
SANGUINET
BELIN
SAUGNACQ
VILLANDRAUT
MOUSTEY
YCHOUX
pte Leyre
BEAULAC
Etang de Biscarosse
PARENTIS-EN-BORN
SORE
CAPTIEUX
CASTELJALOUX
Etang d'Aureilhan
R. de Bourricos
Escource
COMMENSACQ
Gde Leyre
MIMIZAN
ESCOURCE
HOUEILLÈS
DURANCE
NÉRAC
SABRES
LABRIT
RÉAUP
MÉZOS
St JULIEN-EN-BORN
Estrigon
La Douze
St GIRONS
Midouze
CASTELNAU
Lixon
MONT-DE-MARSAN
Adour
N
DAX
BAYONNE

FIG. 30.

# CONCLUSIONS

Nous avons étudié la composition chimique de l'eau contenue dans les sols de la région de Bordeaux, afin de saisir certains des mécanismes de l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines.

L'eau du sol a d'abord été extraite par dilution des différents horizons de podzols au Haillan, à Martignas et à Caupian, et de sols bruns à Baron et à Pompignac; puis elle a été comparée avec l'eau souterraine sous-jacente. Afin de pouvoir suivre l'évolution de la composition chimique dans le temps, nous avions installé des cases lysimétriques sous chacun des horizons d'un sol podzolique à Talence.

Le bilan du chlore et de l'eau des cases lysimétriques de Talence nous a montré que l'on pouvait, à l'aide de la concentration en chlore de l'eau de pluie et la concentration en chlore de l'eau souterraine, calculer dans un certain nombre de cas, le coefficient d'alimentation des eaux souterraines. Nous avons appliqué la méthode correspondante aux nappes des « Sables des Landes ».

Les conclusions que nous avons tirées de nos observations, cela va de soi, ne s'appliquent qu'à des sols podzoliques sur sable siliceux et à des sols bruns lessivés sur calcaire grossier, sous un climat semblable à celui de Bordeaux. Nous sommes cependant persuadé que beaucoup de nos conclusions pourront être appliquées à bon nombre d'autres cas.

Nous sommes arrivé aux résultats suivants :

**La composition chimique des eaux d'imbibition des sols varie avec l'horizon pédologique** dans les sols podzoliques du Haillan, de Martignas, de Caupian et dans les sols bruns de Baron et de Pompignac.

*Solutions des podzols.* — La teneur en calcium et en magnésium des solutions des sols est généralement faible ou nulle en surface. Elle augmente légèrement vers la profondeur (carrière du Haillan, février 1954; carrière de Martignas,

décembre 1955). La faible concentration à la surface des horizons pédologiques est due au lessivage par les eaux d'infiltration. Mais pendant les périodes où l'évapo-transpiration se fait particulièrement sentir, il peut y avoir un renversement du gradient de concentration (carrière de Martignas et carrière de Caupian).

Les alcalins Na et K varient plus ou moins suivant les horizons et leurs teneurs relatives dépendent beaucoup plus des échanges de bases, comme l'indique en particulier le rapport K/Na.

La concentration des bicarbonates n'est pas non plus toujours la même dans les solutions des divers horizons; mais on observe des règles de distribution : la tendance générale est un accroissement vers la profondeur, surtout lorsqu'il y a eu un lessivage récent. A la suite d'une longue période pluvieuse, les bicarbonates sont, au contraire, plus abondants dans les horizons A, lieu de production importante du $CO_2$, par suite de l'activité biologique.

Le rapport $SO_4$/Cl reste à peu près le même pendant les périodes d'infiltration, alors qu'il subit des variations d'un horizon à l'autre pendant la période d'évapo-transpiration. Il en est d'ailleurs de même du rapport Mg/Ca.

Un fait important doit être signalé. La concentration en chlore varie très peu suivant les horizons pédologiques. Il est pour le moment difficile d'interpréter d'une manière précise cette constatation.

Ainsi, il y a une différenciation chimique des solutions des sols suivant les horizons. Elle n'est certes pas très poussée dans les sols podzoliques, ce qui est vraisemblablement dû :

1° A la nature presque absolument siliceuse de la roche-mère; il y a peu de substances facilement solubles et par conséquent aussi, peu de précipitations;

2° Au lessivage important par les pluies abondantes qui traversent rapidement les sables, et empêchent ainsi toute concentration des éléments chimiques dans les solutions.

Seule l'évapo-transpiration peut amener des perturbations qui sont cependant peu marquées.

*Solutions des sols bruns.* — Le calcium et le magnésium présentent une différenciation. Leurs teneurs sont, en effet, généralement plus élevées en surface et en profondeur que dans la partie moyenne.

La concentration en sodium varie aussi suivant les horizons. Mais si dans certains cas elle s'accroît, dans d'autres elle diminue vers la roche-mère. Le même phénomène a lieu pour le rapport K/Na, selon les échanges de bases souvent puissants en raison de la nature argileuse des sols.

Les chlorures, eux, semblent traverser les terrains sans être sensiblement affectés.

Ici aussi, il y a une différenciation suivant les horizons pédologiques. Mais elle est beaucoup plus poussée et plus nette que dans les solutions des sols podzoliques. Cela tient :

1° A la nature argileuse des terrains et à la nature calcaire de la roche-mère. Les eaux d'infiltration rencontrent des éléments chimiques facilement attaquables. Il peut aussi se produire des précipitations;

2° A la vitesse d'infiltration relativement lente des eaux superficielles, ce qui permet aux eaux de se charger abondamment en sels. Cette lenteur relative est due à la nature argileuse des sols.

On voit ainsi que la composition chimique des solutions des sols n'est pas la même dans les différents horizons d'un même sol, et que la différence entre les divers horizons est beaucoup plus prononcée dans le cas des sols bruns que dans celui des sols podzoliques.

Ces variations de la composition chimique des solutions des sols, à une période donnée de l'année, si elles sont indéniables, sont très faibles, beaucoup plus faibles que ce que nous attendions. Dans les sols podzoliques, il y a même tendance à l'homogénéisation des solutions suivant la verticale.

*Cycle pédologique. - Homogénéisation des solutions suivant la verticale.* — Les études des cases lysimétriques nous ont montré l'existence d'un cycle pédologique du mouvement des éléments chimiques des solutions de sols; il y a une homogénéisation de ces solutions sur toute la hauteur des profils. Ce cycle et cette homogénéisation sont très nets dans les sols podzoliques en raison de la grande perméabilité du terrain : en effet, les plantes extraient par leurs racines une grande quantité de substances minérales à partir des solutions des sols, en particulier dans l'horizon B et la partie supérieure de l'horizon C. Ces substances sont ramenées à la surface du sol dans l'appareil végétatif aérien. Les feuilles et les branches mortes retombent et donnent naissance à de l'humus. Une minéralisation des matières organiques se produit. Les substances minérales passent ainsi de nouveau en solution et

descendent dans le sol, où elles sont bientôt reprises par les racines. Toutefois, les descentes et les montées sont inégales; aussi peut-il y avoir, soit accumulation en surface des éléments plus facilement mis en solution par les plantes que par l'eau, par exemple la silice, soit appauvrissement en surface et accumulation en profondeur des éléments plus facilement mis en solution par l'eau que par les plantes, comme le fer, l'alumine.

En définitive, les remontées et les descentes successives des sels amènent forcément, malgré certaines accumulations dans tel ou tel horizon du sol, une tendance à une homogénéisation de la composition chimique des solutions des sols.

Cela nous conduit à considérer les horizons A et B, c'est-à-dire la totalité du sol agricole proprement dit, comme un résidu de l'attaque de la roche-mère, surtout de sa partie supérieure (horizon C). Le sol, horizon A et B, est composé de toutes les parties insolubles et de tous les éléments qui se précipitent à partir des solutions, dans l'horizon B. Il renferme lui-même, grâce à ses solutions et à la remontée des sels par la végétation des éléments solubles et des éléments de la roche-mère passagèrement solubles, ensuite précipitées.

Ainsi, les horizons A et B peuvent être considérés comme des horizons de lessivage de terrains; A est un horizon où les précipitations ne peuvent se faire en raison de l'acidité d'origine organique : acides organiques, $CO_2$, etc.; B est un horizon où certains éléments proviennent non des constituants solides de l'horizon A, mais d'éléments dont l'origine est la partie supérieure de l'horizon C et des éléments de l'eau de pluie. Tous ces éléments entrent dans le cycle pédologique qui passe non seulement à travers le sol, mais aussi à l'intérieur des végétaux.

**L'étude des solutions de divers sols des terrains de la région bordelaise nous a montré aussi que la composition chimique des solutions des sols varie avec la nature pédologique. Cette étude a porté sur les sols podzoliques et les sols bruns :**

Tout d'abord, les concentrations des divers éléments chimiques des eaux d'imbibition des podzols diffèrent grandement de celles des eaux des sols bruns. Dans le premier cas, elles sont bien plus faibles pour la plupart des éléments. Dans les sols podzoliques, les concentrations très faibles du calcium ne dépassent pas 1,69 méquiv., alors que dans les sols bruns

elles sont bien plus élevées et vont de 2 à 18 méquiv. Le magnésium se comporte sensiblement de la même manière que le calcium.

Les ions bicarbonates des eaux d'imbibition des sols bruns possèdent toujours des concentrations fortes, bien supérieures à celles des eaux d'imbibition des sols podzoliques; cela provient surtout de ce que, dans les solutions des sols bruns, aux bicarbonates dont l'origine est le gaz carbonique libre de l'atmosphère du sol, s'ajoutent des ions bicarbonates issus du $CO_3$ des carbonates dissous, ce qui n'a pas lieu dans les solutions des sols podzoliques privés de carbonates. Mais alors que dans les solutions des sols podzoliques les concentrations en Ca et en Mg diffèrent peu de celles du Na et du Cl, dans les sols bruns, à l'augmentation des teneurs en Ca et en Mg ne correspond pas une augmentation du Cl et du Na. Aussi les rapports r Ca/r Na, r Ca/r Cl, r $CO_3$/r Na, r $CO_3H$/r Cl [1] sont toujours bien plus grands dans les solutions des sols bruns que dans celles des sols podzoliques : dans les premiers, bien supérieurs à plusieurs unités; dans les seconds, au voisinage de 1 ou même inférieurs à 1. Enfin, la concentration générale des solutions est bien plus grande dans les sols bruns que dans les sols podzoliques.

Tout ceci est dû à la nature du terrain lui-même. Le sable des Landes est purement siliceux. Donc, d'une part, les eaux d'infiltration ont peu de matériel à dissoudre et il ne se produit que de faibles précipitations; d'autre part, les eaux d'infiltration traversent trop rapidement le sol pour qu'elles aient le temps de se concentrer suffisamment. Au contraire, dans les sols bruns (sol argilo-calcaire), les eaux d'infiltration rencontrent des substances attaquables, telles que les carbonates; de plus, elles descendent lentement vers la profondeur, permettant ainsi des concentrations élevées.

**Les eaux contenues dans le sol agricole, qu'elles soient obtenues par dilution du sol, ou par drainage des cases lysimétriques, ont la même composition chimique que les eaux des nappes souterraines sous-jacentes :**

a) Il suffit d'examiner les graphiques semi-logarithmiques des analyses et en particulier sur ces graphiques, les rapports r Mg/r Ca, r $SO_4$/r Cl, $\frac{r\,Na}{r\,Ca + r\,Mg}$, $\frac{r\,Na}{r\,Mg}$, r Cl/r Na, c'est-à-

(1) r placé devant le symbole chimique, signifie qu'il s'agit de milliéquivalents.

dire les pentes des droites reliant ces différents éléments chimiques entre eux. Ces rapports ne sont certes pas tous exactement égaux, parce que dans le cas d'eaux peu concentrées, la moindre variation des valeurs absolues entraîne des variations importantes de valeurs relatives. Cela ne détruit pas la parenté des eaux. Cela est vrai, aussi bien pour les sols bruns lessivés que pour les sols podzoliques et les sols des cases lysimétriques.

Si la composition des eaux des sols peut varier d'un point à un autre, pour une même nature pédologique, la composition des eaux souterraines suit la même variation. De plus, si dans un même sol la composition des eaux varie d'une saison à une autre, l'eau de la nappe sous-jacente suit la même variation. Nous avons observé ce fait aussi bien pour les eaux des sols bruns que pour celles des sols podzoliques et des cases lysimétriques.

*b)* La concentration des eaux des sols n'est pas très différente de celle des eaux des nappes sous-jacentes. Elle est plus faible dans les eaux des sols podzoliques que dans celles des sols bruns lessivés, par suite d'une plus faible teneur en bicarbonates. Il en est de même dans les eaux souterraines correspondantes. Cette faible différence de concentration signifie que c'est dans le sol agricole que l'eau souterraine acquiert sa composition chimique, qu'il y a peu de modifications au cours de l'infiltration dans la zone d'aération ou au cours du cheminement de l'eau dans la nappe. Telle est la conclusion relative aux sols podzoliques et aux sols bruns étudiés. Elle pourra certainement être élargie à d'autres sols et à d'autres climats, mais cela reste à montrer.

Si les eaux des nappes sous-jacentes appartiennent très étroitement à la même famille hydrochimique que les eaux des sols agricoles, il y a cependant quelques différences très significatives :

*a)* En particulier, la concentration en bicarbonates dans le sol agricole est très généralement beaucoup plus élevée que dans les eaux des nappes.

Dans les eaux des sols bruns lessivés, $HCO_3$ atteint en général 9 à 20 milliéquivalents; l'eau de la nappe n'en contient que 6. Dans les eaux des sols podzoliques, $HCO_3$ va de 0,1 à 1,9 milliéquivalent; normalement, dans la nappe, r $HCO_3$ est voisin de 0,1. Dans les cases lysimétriques, r $HCO_3$ est généralement compris entre 2,5 et 4 milliéquivalents, et dans la

nappe sous-jacente r $HCO_3$ a les valeurs de 1,4 et 2,5. (La teneur de 5,2 à 5,7 du puits de la Préhistoire ne peut être prise en considération, en raison des matières organiques abondantes qui s'y trouvent et qui par oxydation ont donné naissance à du $CO_2$.)

Les valeurs plus faibles des eaux des sables podzoliques s'expliquent par l'absence de carbonates dans ces terrains. On remarquera que l'on peut observer le même phénomène dans les eaux recueillies dans les cases lysimétriques d'autres régions. Ainsi, les eaux des cases lysimétriques de Versailles ont une teneur de $HCO_3$ de 4,8 à 12 milliéquivalents (Bastisse, 1951-1953), alors que dans les eaux souterraines ordinaires, elle n'est, d'une manière générale, que de 4 milliéquivalents seulement.

*b)* Dans l'eau des solutions des sols, la teneur en $NO_3$ est toujours beaucoup plus élevée que dans les nappes sous-jacentes.

Dans les eaux des sols bruns, si dans certains cas la concentration en $NO_3$ est nulle, dans la plupart des cas nous avons noté des valeurs supérieures à celles des eaux souterraines; elles peuvent atteindre 1,5 milliéquivalent. Dans la nappe, $NO_3$ a une concentration de 0,01 à 0,26 milliéquivalent. Dans les eaux des sols podzoliques étudiés, r $NO_3$ est égal à 0,1 à 0,18 contre 0 dans la nappe.

Dans les eaux des sols des cases lysimétriques, $NO_3$ peut atteindre 32 milliéquivalents, alors que dans l'eau de la nappe prise au tube piézométrique, il n'y a que 1 milliéquivalent et au puits 1,5 à 5 milliéquivalents seulement malgré la pollution existant dans ce puits.

Ce sont d'ailleurs des faits que nous pouvons généraliser. A Versailles (Bastisse, 1951-1953), la concentration en $NO_3$ des eaux de drainage des cases cultivées varie de 1,05 à 2,26 milliéquivalents; dans les cases nues, elle est de 4,45. A l'Ariana, près de Tunis (Bœuf et Novikof, 1933-1936), dans les cases cultivées, r $NO_3$ est de 4,2 à 6,3; dans la case nue, de 6,7. A Clermont-Ferrand (Collier et Robelin, 1955), dans les cases cultivées, r $NO_3$ = 1,35; dans la case nue, 4,45. Dans les solutions des sols étudiées par Schlœsing (1870), $NO_3$ est toujours très élevé et compris entre 0,23 et 8,7 milliéquivalents. La moyenne est de 3,7 milliéquivalents.

Or, la statistique de la teneur en $NO_3$, faite sur un très grand nombre d'eaux souterraines, montre que 95 % de ces eaux contiennent moins de 0,84 r $NO_3$.

La teneur plus faible en $NO_3$ des eaux souterraines peut s'expliquer de la manière suivante :

Le cycle du $NO_3$ se ferme presque entièrement dans le sol. Il ne s'en échappe que peu vers les eaux souterraines. Puisque l'on peut admettre la permanence des phénomènes dans le sol, on est conduit à penser que ce qui s'échappe vers la profondeur est égal à l'excédent des gains sur les pertes à travers le sol. Dans ces gains, il y a le $NO_3$ apporté par la pluie. Dans ces pertes, il y a la consommation par la végétation, le retour sous forme d'azote vers l'atmosphère. L'examen des cases lysimétriques le montre clairement. La teneur en $NO_3$ est plus faible dans les eaux drainées par les cases cultivées que dans celles qui viennent des cases nues. Le cycle à l'intérieur du sol est essentiellement commandé par les activités biologiques.

Les rapports r K/r Na des eaux des sols sont toujours supérieurs à ceux des eaux de la nappe souterraine sous-jacente :

Dans les eaux des sols bruns podzolisés, ils étaient de 0 à 0,263 (novembre 1954), de 0,161 à 0,392 (mai 1956), à Baron; de 0,115 à 0,158 à Pompignac; tandis que dans l'eau des nappes, ils étaient de 0,13 (novembre 1954) et de 0,092 (mai 1956) à Baron, et de 0,038 à Pompignac.

Dans les eaux des sols podzoliques, nous avions trouvé des rapports de 0,157 à 2,68 au Haillan, en février 1954, de 1,64 à 3,9 en avril 1955, de 0,36 à 0,84 à Martignas, de 0 à 0,89 à Caupian; dans les nappes, nous avions des rapports de 0,119 au Haillan, en février 1954, de 0,43 en avril 1955, de 0 à Martignas et à Caupian.

Dans les eaux de drainage des cases lysimétriques, en $D_1$, le rapport a varié de 0,15 à 0,55; en $D_2$, de 0,1 à 0,35; en $D_3$, de 0,1 à 0,32. Dans le forage, nous avons eu un rapport de 0,12 à 0,16, et dans le piézomètre, un rapport de 0,11.

Remarquons que les solutions des sols ou les eaux des lysimètres d'autres sols et d'autres régions, ont aussi des rapports r K/r Na élevés. Ainsi les rapports r K/r Na des solutions des sols de Schlœsing (1870) vont de 0,06 à 7,2 avec une moyenne de 0,97 pour 9 analyses. Dans les cases lysimétriques (Pantanelli, 1937) de Bari (Italie), les eaux de drainage des alluvions rouges donnent un rapport allant de 0,05 à 0,08; les eaux de drainage du tuf, un rapport de 0,40 à 0,45. Ces derniers rapports sont très élevés, du potassium étant apporté par des matériaux volcaniques. Les eaux des cases cultivées de Versailles (Bastisse, 1951-1953) ont un

rapport de 12,74, et celles des cases nues 16,28. Dans les cases lysimétriques de Clermont-Ferrand (Collier et Robelin, 1955), ces rapports sont de 0,56 pour les cases cultivées et de 0,43 pour les cases nues.

Si maintenant nous comparons ces rapports à ceux que donnent les statistiques dressées par H. Schœller (1955-1956) pour les eaux souterraines, nous constatons que les rapports r K/r Na des eaux des sols que nous venons d'examiner, très rarement trouvés dans les eaux souterraines où ils sont inférieurs à 0,18, sont nettement plus élevés.

La teneur plus faible du potassium des eaux souterraines est due au fait que le potassium est absorbé sélectivement par les racines des plantes dans les horizons B et C. Puis il est ramené en surface par ces plantes, descend à travers l'horizon A après la mort des végétaux jusqu'en B et C où il est à nouveau repris. Le cycle du potassium se ferme presque complètement dans le sol. Une partie seulement de K s'échappe du cycle pour gagner les eaux souterraines. Le fait que les eaux de drainage des cases cultivées ont un rapport r K/r Na plus petit que celui des cases nues est une confirmation de ce qui vient d'être dit.

La similitude entre les eaux des cases lysimétriques et les eaux des nappes sous-jacentes avait, d'ailleurs, été déjà observée par Buchan (1958).

En effet, les cases lysimétriques de 3 pieds de profondeur, soit 91,54 cm, dans le « Bunter Sandstone », couvert d'une mince couche de sol aux stations de pompage de la Nottingham Corporation, à Bestwood et à Rufford, ont livré des eaux dont la composition chimique a été comparée par Buchan avec celle de l'eau de puits voisins, dans le Bunter Sandstone.

Comme le fait remarquer Buchan, l'eau des lysimètres ne peut ici ressembler exactement à celle des puits, car les lysimètres ne reproduisent pas exactement le type des couches traversées par l'eau atteignant les puits. C'est ainsi que les rapports r Mg/r Ca, r $SO_4$/r Cl sont assez divergents.

Néanmoins, d'après Buchan, les ressemblances seraient assez bonnes. Mais elles sont en tous les cas moins bonnes que celles que nous avons trouvées, car nos études, contrairement à celles de Buchan, ont porté sur un sol en place et sur la nappe souterraine vraiment sous-jacente. Il est possible, comme le montre la faible valeur du chlore des eaux d'infiltration des cases, que ces eaux soient celles de la

| | Bestwood | | Rufford | |
|---|---|---|---|---|
| | Lysimètre (1) | Puits (2) | Lysimètre (3) | Puits (4) |
| | (en mg/l) | (en mg/l) | (en mg/l) | (en mg/l) |
| Ca | 118,00 | 40,00 | 42,00 | 25,00 |
| Mg | 37,68 | 16,15 | 3,38 | 13,94 |
| Na | 9,20 | 2,22 | 1,15 | 19,78 |
| $CO_3$ | 234,00 | 48,00 | 36,00 | 36,00 |
| $SO_4$ | 57,62 | 32,90 | 49,39 | 67,30 |
| Cl | 3,55 | 24,90 | 7,10 | 17,80 |
| $NO_3$ | 18,60 | 46,14 | 0 | 0 |
| $SiO_2$ | 0 | 2,00 | 0 | 2,00 |
| $Fe_2O_3$ | 0 | 0,10 | 1,00 | 0,18 |
| Total du résidu | 478,65 | 212,4 | 259,02 | 302,67 |
| r Mg/r Ca | 0,53 | 0,67 | 0,13 | 0,93 |
| r $SO_4$/r Cl | 12,0 | 1,01 | 5,15 | 2,80 |
| r Na/r Cl | 3,99 | 0,14 | 0,25 | 1,71 |

période de hautes eaux et qu'elles ne puissent de ce fait donner une image vraie.

Nous avons montré que les solutions des sols bruns lessivés diffèrent de celles des sols podzoliques et que la composition chimique des eaux des nappes phréatiques sous-jacentes, reflète celle des sols. **Il en résulte que nous avons aussi une relation entre la composition chimique des eaux souterraines et la nature pédologique des sols** (M. Schœller, 1958-2).

Cette relation avait été entrevue par quelques auteurs, mais sans précision. L'un des premiers qui ait montré l'influence de la nature pédologique du sol sur la composition chimique des eaux souterraines est Zonn (1945). Il a mis en évidence la ressemblance de la composition chimique des extraits des sols avec la composition chimique des eaux souterraines. Il s'agissait de 3 solonetz et de 1 solonetz-châtain.

Les comparaisons que nous avons faites des analyses montrent encore mieux que celles de Zonn la ressemblance. En effet, Zonn utilise les caractéristiques de Palmer qui, en ne tenant compte que des acides forts, ne distinguent pas les rôles relatifs de $SO_4$ et de Cl. Les eaux des solonetz et

des nappes souterraines se ressemblent par leurs rapports r $SO_4$/r Cl très grand (4 - 10), r Mg/r Ca autour de 1 et la forte inégalité r Cl < r Na. Les eaux des solonetz-châtain et celles de la nappe souterraine ont au contraire un rapport r $SO_4$/r Cl inférieur à l'unité, r Mg/r Ca est très petit et r Cl plus grand que r Na.

H. Schœller nous a indiqué (communication orale) que les eaux des nappes souterraines sous les sols podzoliques de la région d'Aïn Draham (Tunisie) ressemblent beaucoup aux eaux des nappes des Landes également sous sol podzolique. Il faut ajouter que, dans les deux cas, la roche-mère est essentiellement siliceuse : les Grès numidiens en Tunisie, les Sables des Landes dans la région étudiée.

Enfin, Petrovic (1956) a indiqué une étroite relation entre la composition chimique des eaux des sols, des eaux souterraines et des eaux superficielles dans la région panonienne où le sol dominant est du type tchernozem accompagné de sols salins. Mais cette relation est assez critiquable, car si cette ressemblance se fait remarquer par la prédominance du Na, elle en diffère par d'autres éléments. En effet, on remarquera que l'on a tantôt r $SO_4$ > r Cl, tantôt r Cl > r $SO_4$, tandis que dans l'eau souterraine on a plus souvent r $SO_4$ > r Cl. Enfin, alors que dans les sols r Mg > r Ca, dans les eaux souterraines c'est l'inverse.

Nos études des solutions des sols et des eaux de drainage des cases lysimétriques ont montré que **la composition chimique des eaux contenues dans un même sol varie suivant les saisons.**

Dans les solutions des sols bruns podzolisés de Baron, la concentration de tous les éléments, à l'exception du chlore, est plus élevée au mois de novembre, à la fin de la période d'évapotranspiration, qu'en mai, à la fin de la période d'infiltration. Si le chlore a diminué à l'automne, c'est qu'il avait été entraîné par des pluies récentes. Les différences portent encore sur les rapports des éléments entre eux. Par exemple, r $SO_4$/r Cl est plus élevé en novembre. C'est à rattacher à la diminution du Cl à ce moment, comme expliqué ci-dessus. Le rapport $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Ca + Mg)}$ décroît vers la profondeur en novembre, tandis qu'il augmente en mai. Il y a liaison avec les échanges de bases. En effet, l'indice d'échange est négatif en novembre et décroît vers la profondeur, tandis qu'en mai il est positif

et s'accroît; pendant la période d'évapo-transpiration, les alcalins ont pu migrer vers le haut par capillarité, plus facilement que les calco-alcalins.

En automne, on observe, en outre, une diminution de K à la suite de son absorption par la végétation. La concentration de la solution elle-même est, comme nous l'avons dit, plus élevée en novembre qu'en mai. La composition de cette solution a été calculée en ramenant les concentrations obtenues par dilution à celles qu'elles auraient dans le volume d'eau existant dans le sol. Mais si nous calculons les concentrations pour un volume d'eau remplissant tous les pores, nous constatons que la différence de concentration entre novembre et mai s'efface : la quantité d'éléments dissous dans l'eau dans un même volume de sol reste la même; autrement dit, l'augmentation de la concentration à l'automne est uniquement le fait de l'évaporation.

Nous retrouvons les mêmes résultats dans les solutions des sols podzoliques au Haillan, mais moins nets, car les analyses ont été faites tardivement en février 1954 et en avril 1955; en février 1954, la concentration générale est plus élevée et le potassium en concentration moins grande qu'en avril 1955.

Dans les cases lysimétriques de Talence, les solutions des sols de la période d'évapo-transpiration évacuées par les premières eaux de drainage de l'automne, ont des concentrations totales beaucoup plus élevées que les solutions des sols de la période d'alimentation. La concentration de tous les éléments augmente, sauf celle du $HCO_3$, comme le montre le tableau suivant :

Rapports de concentration entre la période de libération et la période de lessivage.

| Cases lysimétriques | Concentration période de libération / Concentration période de lessivage | | |
|---|---|---|---|
| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
| Cl | 23,8 | 44,9 | 48,5 |
| $SO_4$ | 18,7 | 14,7 | 39,4 |
| Ca | 7,8 | 4,6 | 2,2 |
| Na | 4,1 | 2,8 | 1,2 |
| $HCO_3$ | 0,56 | 0,64 | 0,71 |

L'augmentation de la concentration n'est pas la même pour tous les éléments : elle est beaucoup plus grande pour les anions Cl et $SO_4$ que pour les cations. Elle est plus grande pour Cl que pour $SO_4$, plus grande pour Ca que pour Mg.

Pour les anions, la variation est d'autant plus importante que les cases sont plus profondes. Mais ceci n'est qu'artificiel, par suite de la construction des cases. Les cases les plus profondes peuvent mieux garder les eaux concentrées à l'abri des faibles pluies pouvant amener un drainage des eaux.

Les variations des cations sont au contraire d'autant moins grandes que les cases sont moins profondes : le terrain pouvant jouer un rôle de volant chimique. En période d'évapotranspiration, l'indice d'échange de bases, qui était négatif en période de lessivage, devient positif, ce qui est lié à l'augmentation plus rapide de la concentration du Ca que du Na.

Ainsi, la composition chimique de la solution du sol change, suivant les saisons.

*Les vagues de concentration des eaux alimentant les nappes.* — L'étude des cases lysimétriques de Talence nous a montré qu'après la longue période d'évapo-transpiration allant du printemps à l'automne, et pendant laquelle aucune eau ne gagne les nappes, les premières eaux de drainage des cases lysimétriques ont une concentration très élevée en éléments chimiques. Par exemple, la concentration du chlore s'accroît très rapidement pour aboutir en quelques jours à un maximum qui peut atteindre 100 à 800 mg/l et même plus. La période de haute concentration peut varier de quinze jours à un mois dans les cases lysimétriques.

Après cela, pendant tout le reste de la période de drainage, la concentration reste normale jusqu'au moment où l'évapotranspiration devient plus grande que l'apport par la pluie, c'est-à-dire jusqu'au moment où les nappes cessent d'être approvisionnées.

Il y a donc une « chasse » du chlore emmagasiné pendant la période d'évaporation, puis libéré par les premières eaux de drainage.

Cette vague de haute concentration descend du sol, à travers la zone d'aération, jusqu'à la nappe souterraine, située en-dessous. Mais elle mettra un certain temps, d'autant plus grand que la zone d'aération est plus épaisse et qu'elle a été mieux égouttée; donc, selon que la période de cessation d'alimentation aura été plus longue. La perméabilité du terrain interviendra également. A Talence, la vague de haute

concentration n'a atteint la nappe située à 6,6 m de profondeur qu'un temps très long (143 jours) après la première infiltration à travers la case lysimétrique $D_3$, la plus profonde. Il a en effet fallu 81 jours pour que la première infiltration descende jusqu'à la nappe. A ce moment est arrivée l'eau douce retenue dans la zone d'infiltration, poussée par la vague salée. L'eau salée n'est parvenue que 62 jours après à la surface de la nappe.

Naturellement, la vague de haute concentration s'atténue au fur et à mesure de sa descente à travers la zone d'aération, car elle y rencontre les eaux peu concentrées de la fin de la période d'alimentation précédente; ces eaux se sont maintenues dans les pores par rétention. Dans la nappe, à Talence, la vague ne se manifeste par exemple pour le chlore que par un accroissement faible de sa concentration qui passe de 14 à 35 mg/l.

Dans les cases lysimétriques d'autres régions, ces mêmes phénomènes peuvent s'observer : ainsi, dans les cases lysimétriques de Versailles (elles ont 1 m² de superficie et seulement 0,60 m de profondeur) on remarque, d'après les résultats donnés par Bastisse (1951), que les concentrations des eaux de drainage sont plus fortes après la période d'été, au moment où le drainage reprend, au début des pluies d'hiver. Ainsi, pour la case nue, on observe des augmentations de concentration en septembre 1934, octobre 1932, novembre 1933 et novembre 1935, tandis que pour la case cultivée ces augmentations de concentration n'ont lieu qu'en novembre 1932, janvier 1933, novembre 1934 et 1935. Puis les concentrations baissent en hiver. L'augmentation de la concentration est environ du double. Le retard des cases lysimétriques cultivées est certainement dû à l'évapo-transpiration plus grande dans ces cases, amenant un plus grand déficit d'eau de rétention.

Nous reproduisons ci-contre les extraits secs en mg/l.

Nous pourrons rapprocher nos conclusions des observations de Buchan (1958). Cet auteur avait déjà montré que les sels accumulés dans le sol pendant la période de prédominance de l'évapo-transpiration sur la pluviométrie, sont entraînés vers la nappe à l'automne, lorsque la hauteur de pluie est plus grande que l'évaporation. Les eaux de la nappe sont alors plus riches en sels dissous : chlorures, nitrates, carbonates.

L'arrivée de cette vague peut ne se faire que quelques jours après la première infiltration, comme par exemple en septembre, dans les calcaires très fissurés de la Grande Oolithe de

LYSIMÈTRES VERSAILLES : EXTRAITS SECS.

| | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Janv. | Fév. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Case nue :* | | | | | | | | | | | | |
| 1932 | 722 | 1 061 | 808 | » | » | » | 1 212 | 1 370 | 1 308 | 1 444 | 1 356 | 756 |
| 1933 | 878 | » | 940 | » | » | » | » | 1 460 | 1 518 | » | 1 164 | » |
| 1934 | 1 356 | » | » | » | » | 1 520 | 1 756 | 1 564 | 1 388 | 1 176 | 644 | 349 |
| 1935 | 310 | 385 | » | 556 | » | » | » | » | 888 | 628 | 300 | 300 |
| *Case cultivée :* | | | | | | | | | | | | |
| 1932 | 520 | 771 | 997 | » | » | » | » | 550 | 1 522 | 1 526 | 1 288 | 664 |
| 1933 | 752 | » | 700 | » | » | » | » | » | » | » | 1 376 | » |
| 1934 | 1 363 | » | » | » | » | » | » | » | 1 536 | 768 | 344 | 300 |
| 1935 | 268 | 400 | » | » | » | » | » | » | 690 | 740 | 236 | 288 |

Costwalds. Et la vague d'eau salée peut se poursuivre jusqu'en février; ensuite, l'eau de la nappe reprend sa concentration normale.

Dans d'autres cas, lorsque l'infiltration vers la nappe est moins rapide, la concentration maxima de la vague d'eau chargée n'atteint pas la nappe avant mars. Au contraire, dans les régions à terrain très perméable et à nappe au voisinage de la surface du sol, une augmentation de la concentration se fait pratiquement après chaque forte pluie, même en été. Ainsi, la dureté totale peut passer de 244 à 258 mg/l et l'alcalinité de 210 à 240 mg/l en dix jours. Les augmentations de Cl n'avaient pas été données.

Mais, lorsque par suite d'une hauteur de pluie relativement abondante pendant la période d'évaporation, à évaporation limitée, il y a continuation du drainage, les vagues de concentration s'estompent. C'est ce qui se produit pour les cases lysimétriques de terrains nus à Rothamsted, comme on peut le voir sur le tableau suivant extrait du travail de LAWES, GILBERT et WARRINGTON (1881).

| Année 1879 | Drainage (en inches) | | | Concentrations (en mg/l de Cl) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Case 20 inches | Case 40 inches | Case 60 inches | Case 20 inches | Case 40 inches | Case 60 inches |
| Janv.... | 2,47 | 2,652 | 2,472 | 2,8 | 3,7 | 3,3 |
| Fév..... | 5,734 | 4,438 | 4,218 | 4,5 | 3,6 | 3,4 |
| Mars.... | 0,138 | 0,284 | 0,257 | 3,6 | 3,7 | 4,0 |
| Avril... | 1,270 | 1,508 | 1,375 | 3,9 | 3,9 | 3,7 |
| Mai..... | 1,217 | 1,393 | 1,297 | 4,2 | 3,6 | 3,8 |
| Juin.... | 2,156 | 2,239 | 2,185 | 2,9 | 3,1 | 3,0 |
| Juil..... | 1,828 | 1,965 | 1,806 | 3,4 | 3,8 | 3,6 |
| Août.... | 4,601 | 4,598 | 4,346 | 1,3 | 2,2 | 2,7 |
| Sept..... | 1,110 | 0,998 | 0,920 | 2,2 | 2,8 | 3,4 |
| Oct..... | 0,221 | 0,422 | 0,426 | 2,7 | 3,0 | 3,3 |
| Nov..... | 0,195 | 0,116 | 0,099 | 3,7 | 4,2 | 4,1 |
| Déc..... | 0,413 | 0,490 | 0,442 | 4,8 | 4,2 | 3,2 |
| Total... | 21,353 | 21,103 | 19,843 | Moy. 3,2 | 3,3 | 3,3 |

**Nous avons montré que l'on peut, connaissant la concentration en chlore de l'eau de pluie (Cl p), de l'eau de drainage (Cl n) et la hauteur de pluie (P), calculer le coefficient d'alimentation A des cases lysimétriques. Nous avons indiqué que cela était applicable à la nappe d'eau souterraine sous-jacente.**

Lorsque l'on connaît la teneur moyenne en chlore de l'eau de pluie et celle de l'eau des nappes phréatiques, on peut calculer le coefficient d'alimentation (A) des nappes, l'évapotranspiration (E) et l'infiltration (I). On a en effet :

$$A = (I - R) \cdot \frac{Cl\,p}{Cl\,n} + \frac{r + r\,t - r\,v + r\,v'}{P \times Cl\,n}.$$

R étant le ruissellement; Cl p la concentration en chlore de l'eau de pluie; Cl n la concentration en chlore de l'eau de la nappe; P la hauteur de pluie; r et r t étant les quantités de chlore dissoutes dans le sol et dans la nappe; r v la quantité de chlore absorbée par la végétation à partir de l'eau du sol; r v' la quantité de chlore restituée au sol par la végétation, après sa mort.

Dans un terrain où le ruissellement est nul, où les assises géologiques ne peuvent céder de chlore par altération ou par dissolution, où il n'y a pas eu d'engrais contenant des chlorures, enfin lorsque r v = r v', l'équation précédente se réduit à A = Cl p/Cl n. Nous avons appliqué cette méthode de calcul du coefficient d'alimentation aux nappes phréatiques des « Sables des Landes », entre Bordeaux et Dax, puis entre l'Océan, Nérac et Mont-de-Marsan. Le terrain aquifère est un sable siliceux. Le ruissellement est à peu près inexistant. On n'utilise pas de chlorures comme engrais. Il n'y a qu'une exportation très faible de la végétation, de telle sorte que r v $\cong$ r v'.

Nous avons dressé une carte des isochlores de la pluie de la région, à l'aide d'analyses d'eau de pluie faites pendant un an. Puis nous avons établi une carte des isochlores de l'eau des nappes phréatiques en période de hautes eaux et une autre en étiage.

Nous avons ainsi calculé le coefficient d'alimentation (A), l'évapo-transpiration (E) et l'infiltration (I) en fonction de la hauteur pluviométrique (P).

En voici les résultats :

Zone Sud

| Période des hautes eaux | | | | Période d'étiage | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) |
| 1 200 | 1/2,36 | 510 | 690 | 1/2,41 | 497 | 703 |
| 1 000 | 1/2,6 | 385 | 615 | 1/2,48 | 402 | 598 |
| 900 | 1/3,2 | 282 | 618 | 1/3,5 | 257 | 643 |
| 800 | 1/3,5 | 228 | 572 | 1/3,8 | 211 | 589 |

Zone Nord

| Période des hautes eaux | | | | Période d'étiage | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) | A | I (en mm) | E (en mm) |
| 850 (1) | 1/2,33 | 365 | 485 | 1/2,38 | 357 | 493 |
| 900 | 1/2,99 | 301 | 599 | 1/3,17 | 284 | 616 |
| 850 | 1/5,5 | 153 | 697 | 1/4,45 | 191 | 659 |
| » | à 1/4,7 | à 178 | à 672 | » | » | » |

(1) Au voisinage de la côte.

Nous constatons une augmentation de l'évapo-transpiration et une diminution de l'infiltration de l'Ouest à l'Est, et par conséquent une diminution du coefficient d'alimentation, comme on pouvait s'y attendre.

Nous avons également appliqué la méthode du chlore aux cours d'eau. Les fleuves côtiers ont donné de bons résultats.

Nous avons comparé les résultats obtenus par cette méthode aux résultats calculés par la méthode de Thornthwaite là où nous avons pu l'appliquer, et nous obtenons des valeurs tout à fait voisines :

| | E (en mm) | Er (en mm) |
|---|---|---|
| Bordeaux - Mérignac..... | 582 | 589 |
| Arcachon..... | 621 | 618 |
| Mont-de-Marsan..... | 647 | 648 |

E : évapo-transpiration calculée avec la méthode du chlore.
Er : évapo-transpiration réelle calculée avec la méthode de Thornthwaite.

Nous voulons terminer en insistant sur le fait que dans les cases lysimétriques la balance du chlore n'est exacte que si l'on considère un intervalle de temps comprenant plusieurs cycles d'infiltration. En effet, d'une année à une autre, il peut y avoir rétention, puis libération du chlore dans le terrain, Lorsqu'il s'agit de nappes, il doit se produire une régularisation par suite de l'amortissement des mouvements périodiques en raison de la hauteur de la zone d'infiltration.

Dans le cycle du chlore intervient le chlore absorbé par la végétation. Si la végétation reste sur place, le chlore absorbé par les plantes est libéré quand elles meurent et retourne dans le sol. Les effets de la végétation étant alors alternativement positifs et négatifs, s'annulent et n'ont aucune influence sur le bilan du chlore. Il est évident que si les plantes sont coupées et enlevées, le bilan se trouve faussé, d'autant plus que les plantes sont capables d'emmagasiner annuellement près de la moitié du chlore apporté par la pluie.

Dans ce cycle du chlore, l'apport par le terrain est pratiquement négligeable, surtout lorsqu'il s'agit de sol siliceux. Naturellement, le bilan sera déséquilibré dans beaucoup de régions agricoles. Et il y a lieu de bien y prêter attention.

L'utilisation des engrais chlorurés, tels que des sels de potasse, amèneront un excès de chlore dans les eaux souterraines. Il en sera de même, mais à un degré moindre, des fumures. Au contraire, les récoltes exporteront du chlore et amèneront un déficit dans les nappes.

Voici enfin une remarque importante : lorsqu'on veut utiliser la formule ci-dessus, **il est nécessaire de prendre pour Cl p, la valeur moyenne correspondant à la période utilisée, car la valeur de Cl p est susceptible de varier grandement d'une pluie à une autre.**

---

# ANNEXES

## LA MIGRATION AQUEUSE ET L'ABSORPTION BIOLOGIQUE DES ÉLÉMENTS DANS LE SOL, D'APRÈS PEREL'MAN (1961) [1].

### A. — Les possibilités de migration aqueuse

Les migrations des éléments entraînés en solution par les mouvements ascendants et descendants jouent un rôle très important dans les sols. Tous les éléments n'ont pas les mêmes possibilités de migrations aqueuses.

La possibilité de migration d'un élément chimique du « milieu » [2], ici le sol, peut, dans beaucoup de cas, être caractérisée par la fraction des atomes d'un élément donné qui peut se mettre en mouvement dans l'unité de temps, autrement dit, la possibilité de migration s'exprime par la vitesse de passage d'un gramme de substance à l'état mobile d'un élément donné. Si Bx est le nombre des atomes d'un élément donné dans le « milieu » ou dans l'une de ses parties, sol, roche, organisme, le nombre d'atomes qui passe à l'état mobile dans l'intervalle de temps $\Delta t$ sera $\Delta Bx$. La fraction d'atomes de Bx passant à l'état mobile sera alors : $\frac{\Delta Bx}{Bx}$ et, par unité de temps : $Px = \frac{\Delta Bx}{Bx} \frac{1}{\Delta t}$. Px représente la possibilité de migration de l'élément x. Pour un intervalle de temps infiniment petit : $Px = \frac{1}{Bx} \cdot \frac{d\,Bx}{dt}$.

(1) Ces données de Perel'man proviennent d'une traduction faite par le Professeur H. Schœller.

(2) La traduction littérale du titre de l'ouvrage de Perel'man est : Géochimie du Landschaft, c'est-à-dire du paysage. Paysage a ici la signification de milieu géographique, ou plus simplement « milieu ».

### B. — Coefficient de migration par l'eau

Ainsi intervient un *coefficient de migration par l'eau.* Ce coefficient Kx est égal au rapport entre la concentration d'un élément x dans l'eau naturelle et la teneur en x de la roche drainée par les eaux. Puisque la concentration de l'élément x dans l'eau (Mx) est généralement exprimée en grammes par litre, et la teneur nx de la roche en cet élément en pour cent en poids de la roche, la formule Kx est donc : $Kx = \frac{Mx \cdot 100}{a \cdot nx}$. a est la somme des substances minérales dissoutes dans l'eau, elle est exprimée en grammes. Plus Kx est grand, plus l'élément est intensément lessivé de la roche et plus sa migration par l'eau dans la solution est intense.

Le coefficient de migration aqueuse peut être déduit de l'équation de la possibilité de migration aqueuse. $\frac{d\,Bx}{dt}$ peut être regardé comme la quantité de l'élément x enlevé par les eaux souterraines pendant une année. Cela pourrait également s'appliquer aux quantités enlevées par les eaux superficielles et les eaux de rivières. Cette quantité est infiniment petite par rapport à la quantité totale de cet élément x dans les roches du « milieu ». On peut aussi admettre qu'un an est une durée de temps infiniment petite, dt, par rapport à la durée d'existence du « milieu ». Si l'on désigne par Q le débit moyen annuel de l'écoulement souterrain ou superficiel de l'eau, on peut écrire : $\frac{d\,Bx}{dt} = Mx \cdot Q$, Mx étant la concentration de l'élément x dans l'eau en grammes par litre. Cela revient à admettre un mouvement presque permanent.

Comme on peut écrire également : $Bx = nx\,M$, M étant la masse de l'ensemble de la roche parcourue par l'écoulement de l'eau, nx étant la teneur moyenne de x dans la roche, on a donc : $Px = \frac{Mx \cdot Q}{nx \cdot M}$.

## C. — Valeurs de l'intensité de migration aqueuse des éléments

Polynov classe selon la valeur de Kx l'intensité de migration de la manière suivante :

| Intensité de migration | Valeur de Kx |
|---|---|
| I. — Migrants très mobiles..... | n . 10 à n . 100 |
| II. — — assez mobiles..... | n à n . 10 (n < 2) |
| III. — — mobiles..... | 0,n à n (n < 5) |
| IV. — — peu mobiles et inertes. | 0,0n à moins. |

Par exemple, pour le « milieu » du Tian-Chan, composé de granite, on a :

| Intensité de migration..... | 100 | 10 | 1 | 0,1 | 00,1 |
|---|---|---|---|---|---|
| I. — Migrants très mobiles ..... | Cl, $SO_4$ | | | | |
| II. — Migrants assez mobiles ..... | | Ca, Mg, Na, F (Sr, Zn, O) | | | |
| III. — Migrants mobiles ..... | | | Si, P, K (Cu, Ni, Co, Mo, V, Mn) | | |
| IV. — Migrants peu mobiles ..... | | | | (Fe, Cr, Al, Ga, Pb, Ti, Sc. Y, TR, Zr, Hf, Nb, Ta, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt. Sn, W, Th) | |

### D. — Classes de migration aqueuse

Tous les éléments ne migrent pas de la même manière et en quantités égales; on peut donc les classer. On peut distinguer des éléments caractéristiques des migrations aqueuses. Ce sont les *éléments typomorphes* tels que $O_2$, $CO_2$, $H_2S$, $H^+$, $OH^-$, $Cl^-$, $SO_4^=$, $HCO_3^-$, $CO_3^=$, $Ca^{++}$, $Mg^{++}$, $Na^+$, $Fe^{++}$ et quelques autres. Je ferai remarquer que ce sont précisément les éléments les plus importants dans les solutions des sols comme dans les eaux souterraines. Ces typomorphes ont un clarke [1] élevé et forment des composés ou des gaz solubles. Les éléments peu solubles à clarke élevé, tels que Al, Ti, de même que les éléments facilement solubles, mais à clarke faible, tels que Ra, Sr, I, etc., ne peuvent être considérés comme des éléments typomorphes. Dans la classification, Perel'man tient compte en premier lieu de l'acidité et de l'alcalinité du milieu, puis du potentiel d'oxydo-réduction qui est lié à la présence de matière organique.

Les principales classes sont indiquées dans le tableau ci-contre.

### E. — Le coefficient d'absorption biologique

Nous avons fait allusion au rôle joué par la végétation dans les mouvements des éléments du sol. Les végétaux créent un mouvement ascendant de substances d'abord absorbées dans les divers horizons du sol, puis accumulées à la surface dans les parties aériennes. Il est nécessaire de connaître la quantité d'éléments susceptibles d'être absorbés. Cette quantité est fonction de la teneur de ces éléments dans la roche. Le rapport Ax entre la concentration lx de l'élément x dans la cendre de la plante et la concentration nx du même élément dans la roche est constant. Ce rapport $Ax = \frac{lx}{nx}$ est le *coefficient d'absorption biologique.*

Pour caractériser l'absorption biologique, on peut aussi utiliser l'équation de possibilité de migration Px qui, dans ce cas, indiquera *l'intensité d'absorption biologique de x.* Bx

(1) Le *clarke,* du nom du géochimiste américain, est un terme introduit par Vernadsky. C'est le pourcentage moyen en poids d'un élément donné dans la croûte terrestre.

## Classes de migration aqueuse.
## Classification des migrateurs aqueux et gazeux.

| Conditions d'acidité et d'alcalinité | Migrateurs aqueux typomorphes | Migrateurs gazeux typomorphes | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $O_2$ Conditions d'oxygénation | $CO_2$ partiellement $CH_4$ Conditions de réduction sans $H_2S$ | $H_2S$ Conditions de réduction avec $H_2S$ |
| Très acide. *p*H < 3. | $H^+$, $SO_4^=$ parfois $Al^{+++}$, $Fe^{+++}$ | I. - Ac. sulfurique. | » | » |
| | $H^+$, *Cl*$^-$, $Al^{+++}$, $Fe^{+++}$ | II. - Acide chlorhydrique. | » | » |
| Faiblement acide. *p*H 3 - 6,5. | $H^+$, acide organique. $HCO_3^-$ | III. - Acide $H^+$. IV. - Acide avec spécialement faible teneur en cations $H^+$. V. - Acide passant au calcique ($H^+$ — $Ca^{++}$). | VI. - Gley acide ($H^+$ — $Fe^{++}$). | » |
| Neutre ou faiblement alcalin. *p*H 6,5 - 8,5. | $Ca^{++}$, $Na^+$, $Fe^{++}$ | VII. - Calcique $Ca^{++}$. VIII. - Calcico-sodique $Ca^{++}$ — $Na^+$. | IX. - Gley carbonaté $Ca^{++}$ — $Fe^{++}$. | » |
| | $Cl^-$, $Na^+$, $SO_4^=$ | X. - Saline $Na^+$ — $SO_4^=$. | » | XI. - Salines et sulfureuses $Na^+$ — $H_2S$. |
| Fortement alcalin. *p*H > 9. | $OH^-$, $Na^+$, $HCO_3^-$, $SiO_2$ | XII. - Sodiques $Na^+$ — $OH^-$. | » | XIII. - Sodico-sulfureux $Na^+$ — $OH$ = $H_2S$ |

étant la quantité totale d'un élément donné dans le sol, la roche ou l'eau, $\Delta Bx$, la quantité d'atomes absorbées par le végétal (ou l'animal) pendant l'intervalle de temps $\Delta t$, $\frac{\Delta Bx}{\Delta t}$ peut être regardé comme étant la quantité de l'élément x qui se trouve dans la plante du « milieu », puisque cette quantité est infiniment petite en comparaison de la masse totale de l'élément x existant dans le « milieu » et puisque le temps dt (croissance de la plante) est très petit par rapport à la durée d'existence du « milieu ».

Pour déterminer la teneur totale de l'élément x de la cendre des plantes du « milieu » donné, il faut multiplier lx (teneur de x dans la cendre) par la quantité totale de la cendre des plantes du « milieu », ce qui sera désigné par M exprimé en tonnes par hectare.

On a : $\frac{\Delta Bx}{\Delta t} = M\ lx.$

Il est aisé de montrer que $Bx = R\ nx$, R étant la quantité totale de la roche ou du sol du « milieu » qui se trouve dans le domaine des racines. On a alors :

$$Px = \frac{1}{Bx}\frac{\Delta Bx}{\Delta t} = \frac{M}{R}\frac{lx}{nx} = \frac{M}{R}\ Ax.$$

$\frac{M}{R}$ est constant dans un « milieu » donné. Par conséquent, *l'intensité biologique d'absorption* Px des éléments dans le « milieu » est directement proportionnelle *au coefficient biologique d'absorption Ax.*

Nous donnons ci-après, en tableaux, la classification du coefficient d'absorption biologique des éléments chimiques, la composition chimique des cendres des plantes rangées suivant leur classification botanique et l'intensité biologique d'absorption des éléments minéraux par ces plantes.

ABSORPTION BIOLOGIQUE DES ÉLÉMENTS.

| | Ax 100 | 10 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Eléments d'accumulation biologique. | I. - Energiquement accumulés. | P, S, Cl, | » | » | » | » |
| | II. - Fortement accumulés. | » | Ca, K, Mg, Na, Sr, B, Zn, As, Mo, Mn (Cu). | » | » | » |
| | III. - Faiblement accumulés et moyennement captés. | » | » | Si, Fe, Ba, F, Rb, Cu, V, Ge, Ni, As, Co, Li, Y, Cs, Ra, Se, Hg. | » | » |
| Eléments de capture biologique. | IV. - Faiblement captés. | » | » | » | Ti, Tb, Al, La, Sn, U, Cr. | » |
| | V. - Très faiblement captés. | » | » | » | » | Sc, Zn, Nb, Ta, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Hf, W. |

COMPARAISON CHIMIQUE DES CENDRES DES PLANTES [1].

| | (2) | CENDRES (%) | EN POURCENTAGE DES CENDRES | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | K | Na | Ca | Mg | Fe | P | S | Si | Cl |
| *Bactéries* | 10 | 7,3 | 14,7 | 0,6 | 6,0 | 4,8 | 0,6 | 1,0 | 1,2 | 0,6 | » |
| *Algues :* | | | | | | | | | | | |
| vertes | 9 | 25,3 | 15,0 | 12,2 | 23,1 | 1,7 | 0,5 | 1,5 | 8,3 | 2,6 | 10,3 |
| brunes | 56 | 27,8 | 18,2 | 12,3 | 8,6 | 3,2 | 0,7 | 1,2 | 6,3 | 1,0 | 20,0 |
| rouges | 27 | 20,0 | 11,0 | 14,8 | 7,0 | 4,2 | 0,6 | 1,6 | 12,7 | 0,7 | 6,7 |
| *Champignons* | 46 | 7,2 | 28,4 | 2,7 | 3,2 | 2,4 | 1,4 | 16,5 | 2,3 | 1,3 | 1,3 |
| *Lichens :* | | | | | | | | | | | |
| crustacés | 3 | 8,7 | 0,98 | 0,5 | 77,6 | 2,1 | 0,9 | 0,09 | 0,8 | 8,2 | » |
| foliacés | 19 | 4,5 | 10,0 | 1,9 | 16,0 | 2,8 | 3,5 | 2,6 | 4,0 | 6,7 | » |
| fruticuleux | 90 | 2,6 | 9,3 | 3,5 | 12,0 | 2,4 | 3,0 | 2,3 | 2,9 | 16,8 | 0,4 |
| *Mousses* | 29 | 4,6 | 8,0 | 2,5 | 16,0 | 4,0 | 5,3 | 2,1 | 2,3 | 12,2 | 4,0 |
| *Fougères* | 9 | 6,9 | 35,4 | 3,3 | 10,0 | 5,0 | 0,6 | 3,6 | 2,4 | 3,7 | 10,2 |
| *Equisétacées* | 49 | 19,0 | 11,2 | 1,5 | 8,1 | 1,6 | 0,6 | 1,8 | 2,2 | 29,3 | 4,1 |
| *Lycopodiacées* | 4 | 5,1 | 13,7 | 0,9 | 4,3 | 2,4 | 0,8 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,4 |
| *Gymnospermes :* | | | | | | | | | | | |
| toute la plante | 22 | 3,8 | 15,4 | » | 26,4 | 4,5 | 2,0 | 6,2 | 6,2 | 4,2 | » |
| Conifères | 5 | 4,5 | 6,5 | » | 21,0 | 1,7 | 0,4 | 2,6 | 6,0 | 16,0 | » |
| *Angiospermes monocotylédones :* | | | | | | | | | | | |
| Aquatiques | 12 | 16,3 | 15,5 | 5,1 | 20,5 | 5,2 | 4,2 | 3,5 | 2,3 | 4,0 | 3,4 |
| Graminées | 260 | 6,6 | 23,0 | 3,1 | 4,4 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 2,4 | 19,0 | 6,1 |
| Liliacées | 10 | 8,1 | 30,7 | 4,8 | 11,2 | 3,5 | 1,1 | 4,6 | 2,4 | 2,7 | 7,3 |
| *Dicotylédones :* | | | | | | | | | | | |
| Polygonées | 15 | 9,5 | 25,0 | 5,0 | 20,0 | 7,5 | 1,4 | 2,6 | 1,9 | 1,5 | 2,9 |
| Chenopodiacées | 290 | 20,5 | 12,4 | 19,5 | 7,3 | 3,8 | 0,9 | 1,6 | 5,0 | 2,4 | 14,5 |
| Crucifères | 108 | 9,6 | 23,0 | 7,7 | 17,0 | 2,3 | 1,5 | 4,0 | 4,0 | 3,0 | 7,9 |
| Papilionacées | 190 | 7,9 | 27,0 | 3,4 | 18,0 | 3,4 | 1,0 | 4,7 | 1,7 | 5,1 | 4,1 |
| Ombellifères | 7 | 13,0 | 28,4 | » | 18,6 | 4,1 | » | 3,1 | 2,0 | » | 7,8 |
| Ericacées | 10 | 2,1 | 16,0 | 4,0 | 16,8 | 6,3 | 1,9 | 3,7 | 2,3 | 5,9 | 2,5 |
| Composées | 12 | 13,8 | 19,7 | 18,3 | 8,6 | 4,1 | 1,7 | 2,3 | 3,4 | 2,2 | 18,1 |
| — | 28 | 7,0 | 18,8 | 8,0 | 12,1 | 3,5 | 1,0 | 3,2 | 2,7 | 3,2 | 9,0 |
| *Plantes cultivées :* | | | | | | | | | | | |
| Graminées | 60 | 7,0 | 31,8 | 1,8 | 4,8 | 2,0 | 0,4 | 3,2 | 2,6 | 15,0 | 5,5 |
| Papilionacées | 50 | 10,4 | 27,0 | 3,2 | 11,8 | 3,2 | 1,7 | 3,4 | 2,4 | 6,6 | 5,8 |

(1) D'après KOVDA (1956), *in* PEREL'MAN (1961, p. 53).
(2) Nombre d'échantillons pour établir la moyenne.

INTENSITÉ D'ABSORPTION BIOLOGIQUE DES ÉLÉMENTS PAR LES PLANTES.

| | (1) | Coefficient biologique d'absorption Ax | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | P | S | Cl | K | Ca | Va | Mg | Si | Fe |
| *Bactéries* | 10 | 12,5 | 13,3 | » | 5,6 | 1,6 | 0,2 | 2,1 | 0,02 | 0,1 |
| *Algues :* | | | | | | | | | | |
| vertes | 9 | 18,7 | 92,2 | 228,8 | 1,9 | 6,4 | 0,4 | 0,8 | 0,09 | 0,09 |
| brunes | 56 | 15,0 | 70,0 | 444,4 | 7,0 | 2,3 | 0,4 | 1,5 | 0,03 | 0,1 |
| rouges | 27 | 20,0 | 14,1 | 148,8 | 4,2 | 1,9 | 0,5 | 2,0 | 0,02 | 0,1 |
| *Champignons* | 46 | 206,2 | 25,5 | 248,8 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 0,04 | 0,2 |
| *Lichens :* | | | | | | | | | | |
| crustacés | 3 | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| foliacés | 19 | 32,5 | 44,4 | » | 3,8 | 4,4 | 0,7 | 1,3 | 0,24 | 0,6 |
| fruticuleux | 90 | 28,7 | 32,2 | 8,8 | 3,6 | 3,3 | 1,3 | 1,1 | 0,60 | 0,5 |
| *Mousses* | 29 | 26,2 | 25,5 | 88,8 | 3,0 | 4,4 | 0,9 | 1,9 | 0,4 | 1,0 |
| *Fougères* | 9 | 45,0 | 26,4 | 226,6 | 13,6 | 2,7 | 1,2 | 2,3 | 0,13 | 0,11 |
| Equisétacées | 49 | 22,5 | 24,4 | 91,1 | 4,3 | 2,2 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 0,11 |
| *Lycopodiacées* | 4 | 21,2 | 17,7 | 31,1 | 5,2 | 1,1 | 0,3 | 1,1 | 0,22 | 0,15 |
| *Gymnospermes :* | | | | | | | | | | |
| toute la plante | 22 | 77,5 | 68,8 | » | 15,9 | 7,3 | » | 2,1 | 0,15 | 0,39 |
| Conifères | 5 | 32,5 | 64,4 | » | 2,5 | 5,8 | » | 0,8 | 0,54 | 0,07 |
| *Angiospermes monocotylédones :* | | | | | | | | | | |
| Aquatiques | 12 | 43,7 | 25,5 | 75,5 | 5,9 | 5,6 | 1,9 | 2,4 | 0,14 | 0,8 |
| Graminées | 260 | 26,2 | 26,6 | 135,5 | 8,8 | 1,2 | 1,19 | 0,9 | 0,68 | 0,4 |
| Liliacées | 10 | 57,5 | 26,6 | 162,2 | 1,18 | 3,1 | 1,8 | 1,6 | 0,09 | 0,2 |
| *Dicotylédones :* | | | | | | | | | | |
| Polygonées | 15 | 32,5 | 21,1 | 64,4 | 9,6 | 5,5 | 1,92 | 3,5 | 0,05 | 0,27 |
| Chénopodiacées | 290 | 20,0 | 55,5 | 324,4 | 4,7 | 2,0 | 7,5 | 1,8 | 0,08 | 0,17 |
| Crucifères | 108 | 50,0 | 44,4 | 175,5 | 8,8 | 4,7 | 2,96 | 1,9 | 0,10 | 0,29 |
| Papilionacées | 190 | 58,7 | 18,8 | 91,1 | 10,3 | 5,0 | 1,3 | 1,6 | 0,18 | 0,19 |
| Ombellifères | 7 | 38,7 | 22,2 | 173,3 | 10,9 | 5,16 | » | 1,9 | » | » |
| Ericacées | 10 | 46,2 | 25,5 | 55,5 | 6,1 | 4,6 | 1,5 | 3,0 | 0,21 | 0,37 |
| Composées | 12 | 28,7 | 37,7 | 402,2 | 7,5 | 1,1 | 7,0 | 1,9 | 0,07 | 0,33 |
| — | 28 | 40,0 | 30,0 | 200,0 | 7,2 | 3,35 | 3,0 | 1,6 | 0,11 | 0,19 |
| *Plantes cultivées :* | | | | | | | | | | |
| Graminées | 60 | 40,0 | 28,8 | 122,2 | 12,2 | 1,3 | 0,69 | 0,9 | 0,53 | 0,07 |
| Papilionacées | 50 | 42,5 | 26,6 | 128,8 | 10,3 | 3,5 | 1,23 | 1,5 | 0,24 | 0,33 |
| Moyenne de tous les groupes | » | 45,5 | 35,9 | 179,1 | 7,02 | 2,8 | 2,6 | 1,4 | 0,33 | 0,33 |

(1) Nombre de plantes d'après lesquelles la moyenne a été établie.

## TABLEAU I

### Analyse des eaux de dilution.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | C | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|
| *BARON (Gironde), novembre 1954 :* | | | | | |
| r Ca | 1,40 | 1,40 | 2 | 2 | 4,80 |
| r Mg | 0,52 | 0,52 | 0 | 0 | 1,17 |
| r K | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0,06 |
| r Na | 0,19 | 0,21 | 0,16 | 0,24 | 0,37 |
| r Cl | 0,12 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,65 |
| r $SO_4$ | 0,16 | 0,27 | 0,27 | 0 | 1,177 |
| r $HCO_3$ | 3,55 | 1,65 | 1,3 | 1,3 | 6,35 |
| r $NO_3$ | 0,09 | 0,12 | 0,10 | 0,18 | 0,26 |
| *p*H | 7,4 | 6,8 | » | 7,4 | 6,8 |
| *BARON (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r Ca | 1,15 | 0,78 | 0,90 | 1,20 | 3 |
| r Mg | 0,41 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,41 |
| r K | 0,051 | 0,028 | 0,015 | 0,028 | 0,028 |
| r Na | 0,130 | 0,173 | 0,121 | 0,130 | 0,304 |
| r Cl | 0,249 | 0,249 | 0,249 | 0,300 | 0,649 |
| r $SO_4$ | 0,218 | 0,146 | 0,270 | » | 0,239 |
| r $HCO_3$ | 2,250 | 1,250 | 1,150 | 1,316 | 6,250 |
| r $NO_3$ | 0,016 | 0,096 | 0,193 | 0,419 | 0,016 |
| r $SiO_2$ | 0,499 | 0,132 | 0,132 | 0,264 | 0,32 |
| *p*H | 6,6 - 6,8 | 6,4 - 6,6 | 6,0 | 6,0 | 6,8 - 6,9 |
| *POMPIGNAC (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 2,16 | 2,32 | » | 1,94 | 4 |
| r Mg | 0,42 | 0,42 | » | 0,42 | 0,42 |
| r K | 0,028 | 0,015 | » | 0,015 | 0,015 |
| r Na | 0,243 | 0,113 | » | 0,095 | 0,391 |
| r Cl | 0,249 | 0,249 | » | 0,249 | 1,149 |
| r $SO_4$ | 0,091 | 0,031 | » | 0,093 | 0,551 |
| r $HCO_3$ | 2,70 | 2,45 | » | 1,70 | 6,50 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | » | 0 | 0,096 |
| r $SiO_2$ | 0 | 0,132 | » | 0,156 | 0,264 |
| *p*H | 6,4 - 6,5 | 6,4 - 6,6 | » | 6,4 | 6,9 - 7,0 |

## TABLEAU II

Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume de l'humidité mesurée du sol.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | C | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|
| *BARON (Gironde), novembre 1954 :* | | | | | |
| r Ca | 22,2 | 4,66 | 14,5 | 24,2 | 4,80 |
| r Mg | 8,21 | 1,75 | 0 | 0 | 1,17 |
| r K | 0,79 | 0 | 0 | 0 | 0,06 |
| r Na | 3 | 2,33 | 1,16 | 2,91 | 0,37 |
| r Cl | 1,89 | 1,11 | 0,724 | 1,21 | 0,65 |
| r $SO_4$ | 2,53 | 2,99 | 1,95 | 0 | 1,18 |
| r $HCO_3$ | 56,1 | 18,3 | 9,4 | 15,75 | 6,35 |
| r $NO_3$ | 1,42 | 1,33 | 0,724 | 2,18 | 0,26 |
| *BARON (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r Ca | 8,39 | 5,65 | 7,24 | 7,80 | 3 |
| r Mg | 2,99 | 1,16 | 1,29 | 1,17 | 0,41 |
| r K | 0,371 | 0,202 | 0,125 | 0,208 | 0,028 |
| r Na | 0,94 | 1,250 | 0,971 | 0,950 | 0,304 |
| r Cl | 1,819 | 1,801 | 2,009 | 2,200 | 0,649 |
| r $SO_4$ | 1,588 | 1,055 | 2,170 | » | 0,239 |
| r $HCO_3$ | 16,420 | 9,04 | 9,25 | 9,65 | 6,250 |
| r $NO_3$ | 0,116 | 0,695 | 1,553 | 3,079 | 0,016 |
| r $SiO_2$ | 3,64 | 0,954 | 1,062 | 1,934 | 0,32 |
| *POMPIGNAC (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | » | tr. | |
| r Mn | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 16,20 | 12,6 | » | 14,80 | 4,0 |
| r Mg | 3,14 | 2,29 | » | 3,20 | 0,42 |
| r K | 0,21 | 0,082 | » | 0,114 | 0,015 |
| r Na | 1,82 | 0,616 | » | 0,723 | 0,391 |
| r Cl | 1,86 | 1,36 | » | 1,39 | 1,149 |
| r $SO_4$ | 0,68 | 0,169 | » | 0,70 | 0,551 |
| r $HCO_3$ | 20,22 | 13,4 | » | 12,95 | 6,50 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | » | 0 | 0,096 |
| r $SiO_2$ | 0 | 0,72 | » | 1,00 | 0,264 |

## TABLEAU III

### Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | C | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|
| *BARON (Gironde), novembre 1954* (fig. 3) : | | | | | |
| r Ca | 6,74 | 3,93 | 14,5 | 7,14 | 4,80 |
| r Mg | 2,5 | 1,48 | 0 | 0 | 1,17 |
| r K | 0,241 | 0 | 0 | 0 | 0,06 |
| r Na | 0,91 | 1,97 | 1,16 | 0,86 | 0,37 |
| r Cl | 0,575 | 0,936 | 0,724 | 0,356 | 0,65 |
| r $SO_4$ | 0,769 | 2,52 | 1,95 | 0 | 1,18 |
| r $HCO_3$ | 17,1 | 15,4 | 9,4 | 4,65 | 6,35 |
| r $NO_3$ | 0,431 | 1,12 | 0,724 | 0,644 | 0,26 |
| *BARON (Gironde), mai 1956* (fig. 4) : | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r Ca | 7,21 | 5,65 | 7,24 | 1,56 | 3 |
| r Mg | 2,57 | 1,16 | 1,29 | 0,236 | 0,41 |
| r K | 0,319 | 0,202 | 0,125 | 0,042 | 0,028 |
| r Na | 0,81 | 1,250 | 0,971 | 0,19 | 0,304 |
| r Cl | 1,56 | 1,801 | 2,009 | 0,44 | 0,649 |
| r $SO_4$ | 1,37 | 2,055 | 2,170 | » | 0,239 |
| r $HCO_3$ | 14,1 | 9,04 | 9,25 | 4,79 | 6,250 |
| r $NO_3$ | 0,0996 | 0,695 | 1,553 | 0,616 | 0,016 |
| r $SiO_2$ | 3,12 | 0,954 | 1,062 | 0,387 | 0,32 |
| *SOL DE POMPIGNAC (Gironde), mai 1956* (fig. 5) : | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 16,03 | 11,82 | » | 14,80 | 4,0 |
| r Mg | 3,11 | 2,15 | » | 3,20 | 0,42 |
| r K | 0,21 | 0,077 | » | 0,114 | 0,015 |
| r Na | 1,80 | 0,580 | » | 0,723 | 0,391 |
| r Cl | 1,84 | 1,280 | » | 1,39 | 1,149 |
| r $SO_4$ | 0,67 | 0,159 | » | 0,70 | 0,551 |
| r $HCO_3$ | 20,01 | 12,6 | » | 12,95 | 6,50 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | » | 0 | 0,096 |
| r $SiO_2$ | 0 | 0,676 | » | 1,00 | 0,264 |

## TABLEAU IV

### Rapports des éléments.

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | C | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|
| *BARON (Gironde), novembre 1954 :* | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 1,33 | 2,69 | 2,70 | 0 | 1,84 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0,372 | 0,372 | 0 | 0 | 0,244 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,263 | 0 | 0 | 0 | 0,162 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Mg + Ca)}$ | 0.125 | 0,109 | 0,08 | 0,12 | 0,072 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,Ca}$ | 0,17 | 0,15 | 0,08 | 0,12 | 0,09 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 29,6 | 16,5 | 13 | 13 | 9,76 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | 22,2 | 6,1 | 4,82 | ∞ | 5,39 |
| i. d. | — 0,30 | — 0,054 | — 0,036 | — 0,095 | + 0,123 |
| *BARON (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,875 | 0,586 | 1,084 | » | 0,367 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0,356 | 0.205 | 0,178 | 0,151 | 0,136 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,392 | 0,161 | 0,123 | 0,215 | 0,092 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Mg + Ca)}$ | 0,115 | 0,212 | 0,132 | 0,117 | 0,971 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,Ca}$ | 0,156 | 0,256 | 0,155 | 0,135 | 0,111 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 9,5 | 5 | 4,6 | 4,4 | 9,6 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | 10,2 | 8,57 | 4,25 | » | 26,04 |
| i. d. | + 0,273 | + 0,192 | 0,453 | + 0,475 | + 0,049 |
| *POMPIGNAC (Gironde), mai 1956 :* | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,365 | 0,124 | » | 0,373 | 0,478 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0,194 | 0,181 | » | 0,278 | 0,105 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,115 | 0,132 | » | 0,158 | 0,038 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Mg + Ca)}$ | 0,105 | 0,047 | » | 0,046 | 0,092 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 10,8 | 9,8 | » | 6,84 | 5,6 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | 29,7 | 79 | » | 18,2 | 11,8 |
| i. d. | — 0,91 | + 0,486 | » | + 0,558 | + 0,646 |

i. d. = Indice de déséquilibre chlore - alcalin.

Positif, c'est $\frac{r\,Cl - r\,Na - r\,K}{r\,Cl}$. Négatif, c'est $\frac{r\,Cl - r\,Na - r\,K}{r\,SO_4 + r\,HCO_3 + r\,NO_3}$.

## TABLEAU V

### Analyse des eaux de dilution.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | $B_2$ | CD | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *LE HAILLAN (Gironde), février 1954 :* | | | | | | |
| r Ca | 0 | 0 | 0,35 | 0,30 | 0,14 | 2,56 |
| r Mg | 0 | 0 | 0,151 | 0 | 0,207 | 0,445 |
| r K | 0,038 | 0,041 | 0,014 | 0,314 | 0,027 | 0,152 |
| r Na | 0,133 | 0,128 | 0,089 | 0,117 | 0,104 | 1,274 |
| r Cl | 0,250 | 0,149 | 0,149 | 0,149 | 0,200 | 0,600 |
| r $SO_4$ | 0,208 | 0,604 | 0 | 0,604 | 0,260 | 0,708 |
| r $HCO_3$ | 0 | 0 | 0,645 | 0,10 | 0,10 | 3,20 |
| *p*H | 5,6 | 5,4 - 5,6 | 5,8 - 5,9 | 6,0 | 6,4 | 7,3 |
| *LE HAILLAN (Gironde), avril 1955 :* | | | | | | |
| r Fe | tr. | » | tr. | tr. | tr. | tr. |
| r Mg | 0,03 | » | 0 | 0,030 | 0 | 0,083 |
| r K | 0,33 | » | 0,61 | 0,23 | 0,59 | 0,54 |
| r Na | 0,12 | » | 0,30 | 0,14 | 0,15 | 1,24 |
| r Cl | 0,112 | » | 0,059 | 0,11 | 0,18 | 0,20 |
| r $SO_4$ | 1,71 | » | 0 | 1,46 | 1,86 | 2,9 |
| r $HCO_3$ | 0,125 | » | 0,50 | 0,125 | 0,125 | 4,3 |
| r $NO_3$ | 0,322 | » | 0,080 | 0,161 | 0,290 | 0,290 |
| *p*H | 6,0 | » | 6,2 | 5,9 | 5,6 | 7,3 |
| *MARTIGNAS (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 0,25 | 0,25 | 0,25 | » | 0,6 | 0,05 |
| r Mg | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r K | 0,256 | 0,256 | 0,256 | » | 0,512 | 0 |
| r Na | 0,574 | 0,71 | 0,574 | » | 0,61 | 0,434 |
| r Cl | 0,57 | 0,39 | 0,35 | » | 0,35 | 0,745 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 0,30 | 0,10 | 0,20 | » | 0,20 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | 0,032 | » | 0,048 | 0 |
| *p*H | 5,4 | 5,2 | 5,2 | » | 6,0 | 5,4 |
| *CAUPIAN (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | | à Martignas |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 0,53 | 0,1 | 0 | » | 0 | 0,05 |
| r Mg | 0,33 | 0,16 | 0,16 | » | 0,29 | 0,33 |
| r K | 0,50 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Na | 0,56 | 0,86 | 0,69 | » | 0,69 | 0,43 |
| r Cl | 0,37 | 0,29 | 0,29 | » | 0,29 | 0,74 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 0,20 | 0,10 | 0,10 | » | 0,20 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0,032 | 0,032 | » | 0 | 0 |

## TABLEAU VI

### Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume de l'humidité mesurée du sol.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | $B_2$ | CD | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *LE HAILLAN (Gironde), février 1954 :* | | | | | | |
| r Ca | 0 | 0 | 1,223 | 1,07 | 0,494 | 2,56 |
| r Mg | 0 | 0 | 0,527 | 0 | 0,730 | 0,445 |
| r K | 0,106 | 0,156 | 0,049 | 1,12 | 0,095 | 0,152 |
| r Na | 0,405 | 0,489 | 0,311 | 0,415 | 0,366 | 1,274 |
| r Cl | 0,763 | 0,569 | 0,520 | 0,529 | 0,705 | 0,6 |
| r $SO_4$ | 0,634 | 2,310 | 2,250 | 2,14 | 0,916 | 0,708 |
| r $HCO_3$ | 0 | 0 | 0 | 0,355 | 0,352 | 3,20 |
| *LE HAILLAN (Gironde), avril 1955 :* | | | | | | |
| r Fe | tr. | » | tr. | tr. | tr. | tr. |
| r Ca | » | » | » | » | » | » |
| r Mg | 0,03 | » | 0 | 0,03 | 0 | 0,083 |
| r K | 0,33 | » | 0,61 | 0,23 | 0,59 | 0,54 |
| r Na | 0,12 | » | 0,30 | 0,14 | 0,15 | 1,24 |
| r Cl | 0,112 | » | 0,059 | 0,11 | 0,18 | 0,20 |
| r $SO_4$ | 1,71 | » | 0 | 1,46 | 1,86 | 2,9 |
| r $HCO_3$ | 0,125 | » | 0,50 | 0,125 | 0,125 | 4,3 |
| r $NO_3$ | 0,322 | » | 0,080 | 0,161 | 0,290 | 0.290 |
| *MARTIGNAS (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 5,02 | 3,8 | 4,5 | » | 10,2 | 0,05 |
| r Mg | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r K | 5,15 | 4,0 | 4,6 | » | 8,7 | 0 |
| r Na | 11,5 | 11,1 | 10,3 | » | 10,4 | 0,434 |
| r Cl | 11,4 | 6,1 | 6,3 | » | 5,95 | 0,745 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 6,02 | 1,56 | 3,6 | » | 3,4 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | 0,57 | » | 0,815 | 0 |
| *CAUPIAN (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | | à Martignas |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 7,05 | 2,57 | 0 | » | 0 | 0,05 |
| r Mg | 4,39 | 4,11 | 4,28 | » | 4,9 | 0 |
| r K | 6,65 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Na | 7,45 | 22,1 | 18,49 | » | 11,79 | 0,43 |
| r Cl | 4,92 | 7,45 | 7,77 | » | 4,9 | 0,74 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 2,66 | 2,57 | 2,68 | » | 3,4 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0,82 | 0,86 | » | 0 | 0 |

## TABLEAU VII

### Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores.

(En milliéquivalents par litre.)

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | $B_2$ | CD | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *LE HAILLAN (Gironde), février 1954* (fig. 10) : | | | | | | |
| r Ca | 0 | 0 | 0,024 | 0,036 | 0,182 | 2,56 |
| r Mg | 0 | 0 | 0,012 | 0 | 0,269 | 0,44 |
| r K | 0,019 | 0,004 | 0,001 | 0,370 | 0,035 | 0,152 |
| r Na | 0,007 | 0,128 | 0,007 | 0,014 | 0,135 | 1,274 |
| r Cl | 0,013 | 0,015 | 0,012 | 0,018 | 0,26 | 0,6 |
| r $SO_4$ | 0,011 | 0,060 | 0,052 | 0,073 | 0,338 | 0,708 |
| r $HCO_3$ | 0 | 0 | 0 | 0,012 | 0,13 | 3,20 |
| *MARTIGNAS (Gironde)*, décembre 1955 (fig. 11) : | | | | | | |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 1,6 | 0,865 | 0,1 | » | 2,28 | 0,05 |
| r Mg | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r K | 1,64 | 0,91 | 1,02 | » | 1,95 | 0 |
| r Na | 3,66 | 2,502 | 2,3 | » | 2,32 | 0,434 |
| r Cl | 3,64 | 1,44 | 1,4 | » | 1,33 | 0,745 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 1,92 | 0,356 | 0,8 | » | 0,76 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0 | 0,127 | » | 0,183 | 0 |
| *CAUPIAN (Gironde), décembre 1955* (fig. 12) : | | | | | | à Martignas |
| r Fe | tr. | tr. | tr. | » | tr. | tr. |
| r Mn | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Ca | 1,83 | 0,43 | 0 | » | 0 | 0,05 |
| r Mg | 1,14 | 0,68 | 0,55 | » | 1,07 | 0 |
| r K | 1,73 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r Na | 1,94 | 3,67 | 2,38 | » | 2,58 | 0,43 |
| r Cl | 1,28 | 1,24 | 1,00 | » | 1,07 | 0,74 |
| r $SO_4$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| r $HCO_3$ | 0,69 | 0,43 | 0,346 | » | 0,74 | 0,1 |
| r $NO_3$ | 0 | 0,14 | 0,11 | » | 0 | 0 |

## TABLEAU VIII

### Rapports des éléments.

| Horizons | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | $B_2$ | CD | Nappe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *LE HAILLAN (Gironde), février 1954 :* | | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,832 | 4,053 | 4,328 | 4,053 | 1,300 | 1,180 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0 | 0 | 0,431 | 0 | 1,48 | 0,174 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,286 | 0,321 | 0,157 | 2,680 | 0,260 | 0,119 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Mg + Ca)}$ | » | » | 0,206 | 1,43 | 0,378 | 0,475 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,Ca}$ | » | » | 0,294 | 1,430 | 0,936 | 0,557 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 0 | 0 | 0 | 0,66 | 0,50 | 9,6 |
| i. d. | + 0,315 | — 0,138 | + 0,306 | — 0,189 | + 0,344 | — 1,376 |
| *LE HAILLAN (Gironde), avril 1955 :* | | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 15,5 | » | 0 | 13,3 | 10,3 | 14,5 |
| $r\,K/r\,Na$ | 2,75 | » | 2,05 | 1,64 | 3,9 | 0,43 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 1,12 | » | 8,49 | 1,14 | 0,695 | 21,5 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | 0,073 | » | ∞ | 0,0856 | 0,0670 | 1,48 |
| i. d. | — 0,157 | » | — 0,93 | — 0,04 | — 0,246 | — 0,21 |
| *MARTIGNAS (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0 | 0 | 0 | » | 0 | 0 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,449 | 0,36 | 0,449 | » | 0,84 | 0 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Ca + Mg)}$ | 3,32 | 3,86 | 3,32 | » | 1,87 | 8,6 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,Ca}$ | 3,32 | 3,86 | 3,32 | » | 1,87 | 8,6 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 0,525 | 0,256 | 0,570 | » | 0,570 | 0,135 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | ∞ | ∞ | ∞ | » | ∞ | ∞ |
| i. d. | — 0,86 | — 5,76 | — 2,06 | » | — 3,11 | + 0,42 |

i. d. = indice de déséquilibre chlore - alcalin.

Négatif, c'est $\frac{r\,Cl - r\,Na - r\,K}{r\,SO_4 + r\,HCO_3 + r\,NO_3}$, Positif, c'est $\frac{r\,Cl - r\,Na - r\,K}{r\,Cl}$.

TABLEAU VIII *(suite)*

RAPPORT DES ÉLÉMENTS.

| HORIZONS | $A_1$ | $A_2$ | $B_1$ | C | NAPPE |
|---|---|---|---|---|---|
| *CAUPIAN (Gironde), décembre 1955 :* | | | | | |
| $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $r\,Mg/r\,Ca$ | 0,622 | 1,6 | 0 | 0 | 0 |
| $r\,K/r\,Na$ | 0,89 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,(Ca + Mg)}$ | 1,23 | 3,31 | 4,31 | 2,38 | 8,6 |
| $\frac{r\,(Na + K)}{r\,Ca}$ | 2,0 | 8,6 | 0 | 0 | 8,6 |
| $r\,HCO_3/r\,Cl$ | 0,540 | 0,344 | 0,344 | 0,690 | 0,135 |
| $r\,HCO_3/r\,SO_4$ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| i. d. | — 3,46 | — 4,31 | — 3,2 | — 2 | + 0,42 |

## TABLEAU IX

Analyses des eaux des cases lysimétriques. (Elles sont exprimées en milligrammes par litre.)

| | | $D_1$ | | | | | | $D_2$ | | | | | | $D_3$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ |
| Décembre 1960 | Ca... | 53,20 | | | | | | 70,80 | | | | | | 64,8 | | | | | |
| | Mg... | | 2,77 | | | | | | 5,80 | | | | | | 5,30 | | | | |
| | Na... | | | 5,00 | | | | | | 5,00 | | | | | | 7,30 | | | |
| | K.... | | | | 4,00 | | | | | | 3,00 | | | | | | 3,00 | | |
| | Fe... | | | | | n | | | | | | n | | | | | | n | |
| | $NH_4$. | | | | | | n | | | | | | n | | | | | | n |
| Février 1961 | Ca... | 64 | | | | | | | | | | | | 74 | | | | | |
| | Mg... | | 2,50 | | | | | | | | | | | | 2 | | | | |
| | Na... | | | 3,00 | | | | | | » | | | | | | 4,5 | | | |
| | K.... | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1 | | |
| | Fe... | | | | | n | | | | | | | | | | | | n | |
| | $NH_4$.. | | | | | | n | | | | | | | | | | | | n |
| Oct.-Nov. 1961 | Ca... | 415 | | | | | | 325 | | | | | | 143 | | | | | |
| | Mg... | | 13 | | | | | | 21 | | | | | | 6,5 | | | | |
| | Na... | | | 20,5 | | | | | | 14 | | | | | | 9 | | | |
| | K.... | | | | 19 | | | | | | 8 | | | | | | 5 | | |
| | Fe... | | | | | n | | | | | | n | | | | | | n | |
| | $NH_4$.. | | | | | | n | | | | | | n | | | | | | n |
| Mars 1962 | Ca... | 44 | | | | | | 73 | | | | | | 64 | | | | | |
| | Mg... | | 2 | | | | | | 3 | | | | | | 5 | | | | |
| | Na... | | | 2 | | | | | | 3 | | | | | | 6 | | | |
| | K.... | | | | 0,5 | | | | | | tr<0,5 | | | | | | 1 | | |
| | Fe... | | | | | 0,19 | | | | | | 0,15 | | | | | | 0,10 | |
| | $NH_4$.. | | | | | | n | | | | | | n | | | | | | n |

ANALYSES DES EAUX DES CASES LYSIMÉTRIQUES. (Elles sont exprimées en milligrammes par litre.)

| | | $D_1$ | | | | | | | $D_2$ | | | | | | | $D_3$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al |
| Décembre 1960 | Cl..... | 7,10 | | | | | | | 3,55 | | | | | | | 1,77 | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 6,58 | | | | | | | 7,00 | | | | | | | 10,28 | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 176,9 | | | | | | | 237,9 | | | | | | | 225,7 | | | | |
| | $NO_3$... | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | n | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | 1,48 | | | | | | | 2,16 | | | | | | | 4,32 | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | 27,07 | | | | | | | 38 | | | | | | | 24,79 | |
| | Al.... | | | | | | | 6,89 | | | | | | | 7,42 | | | | | | | 7,42 |
| Février 1961 | Cl..... | 10 | | | | | | | | | | | | | | 8 | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 186 | | | | | | | | | | | | | | 228 | | | | |
| | $NO_3$... | | | | n | | | | | | | » | | | | | | | n | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | n | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | n | |
| | Al.... | | | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | n |
| Oct.-Nov. 1961 | Cl..... | 155 | | | | | | | 159 | | | | | | | 86 | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 123 | | | | | | | 103 | | | | | | | 80 | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 98 | | | | | | | 152 | | | | | | | 161 | | | | |
| | $NO_3$... | | | | 32 | | | | | | | 1 | | | | | | | 30,5 | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | n | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | 13,2 | | | | | | | 14,5 | | | | | | | 10,4 | |
| | Al.... | | | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | n |
| Mars 1962 | Cl..... | 4 | | | | | | | 4 | | | | | | | 6 | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 4 | | | | | | | 1 | | | | | | | 8.5 | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 134 | | | | | | | 228 | | | | | | | 213 | | | | |
| | $NO_3$... | | | | 1,8 | | | | | | | 1,2 | | | | | | | 1 | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | n | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | 12,6 | | | | | | | 18,4 | | | | | | | 11,6 | |
| | Al..... | | | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | n |

TABL

ANALYSES DES EAUX DES CASES LYSIMÉTRIQU

| | | $D_1$ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $r\,SO_4/r\,Cl$ | $r\,Mg/r\,Ca$ | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | $r\,Mg/r\,Na$ | $r\,Ca/(r\,Na + r\,K)$ | $r\,K/r\,Na$ | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | $r\,SO_4/r\,Cl$ |
| Décembre 1960 | $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,685 | | | | | | | | 1,45 |
| | $r\,Mg/r\,Ca$ | | 0,087 | | | | | | | |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | | | 9,1 | | | | | | |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | | | | −0,085 | | | | | |
| | $r\,Mg/r\,Na$ | | | | | 1,06 | | | | |
| | $r\,Ca/r\,(Na + K)$ | | | | | | 8,34 | | | |
| | $r\,K/r\,Na$ | | | | | | | 0,472 | | |
| | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | | | | | | | | — 0,24 | |
| Février 1961 | $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,0715 | | | | | | | | |
| | $r\,Mg/r\,Ca$ | | 0,0689 | | | | | | | |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | | | 22,8 | | | | | | |
| | $\frac{r\,(Cl - Na)}{r\,Cl}$ | | | | +0,535 | | | | | |
| | $r\,Mg/r\,Na$ | | | | | 1,69 | | | | |
| | $r\,Ca/r\,(Na + K)$ | | | | | | 21,4 | | | |
| | $r\,K/r\,Na$ | | | | | | | 0,201 | | |
| | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | | | | | | | | + 0,15 | |

lles sont exprimées en milligrammes par litre.)

| D$_2$ | | | | | | D$_3$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Na + r\,K}$ | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | r Mg/r Na | r Ca/(r Na + r K) | r K/r Na | r Ca — r $HCO_3$ | r $SO_4$/r Cl | r Mg/r Ca | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | r Mg/r Na | r Ca/(r Na + r K) | r K/r Na | r Ca — r $HCO_3$ |
| | | | | | | 4.3 | | | | | | | |
| | | | | | | | 0,136 | | | | | | |
| 3,7 | | | | | | | | 9,4 | | | | | |
| | — 11,7 | | | | | | | | — 5,34 | | | | |
| | | 2,22 | | | | | | | | 1,39 | | | |
| | | | 12,1 | | | | | | | | 8,25 | | |
| | | | | 0,354 | | | | | | | | 0,242 | |
| | | | | | 0.34 | | | | | | | | — 0,46 |
| | | | | | | 0,091 | | | | | | | |
| | | | | | | | 0,0485 | | | | | | |
| | | | | | | | | 1,77 | | | | | |
| | | | | | | | | | +0,090 | | | | |
| | | | | | | | | | | 0,90 | | | |
| | | | | | | | | | | | 16.8 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,130 | |
| | | | | | | | | | | | | | + 0.05 |

TABLE

ANALYSES DES EAUX DES CASES LYSIMÉTRIQU

| | | D₁ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | r $SO_4$/r Cl | r Mg/r Ca | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | r Mg/r Na | r Ca/(r Na + r K) | r K/r Na | r Ca — r $HCO_3$ | r $SO_4$/r Cl |
| Oct.-Nov. 1961 | r $SO_4$/r Cl..... | 0,589 | | | | | | | | 0,65 |
| | r Mg/r Ca..... | | 0,0516 | | | | | | | 0, |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | | | 15,8 | | | | | | |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | | | | +0,79 | | | | | |
| | r Mg/r Na..... | | | | | 1,20 | | | | |
| | r Ca/r (Na + K) | | | | | | 15,01 | | | |
| | r K/r Na..... | | | | | | | 0,549 | | |
| | r Ca — r $HCO_3$.. | | | | | | | | 19,75 | |
| Mars 1962 | r $SO_4$/r Cl..... | 0,719 | | | | | | | | 0,586 |
| | r Mg/r Ca..... | | 0,0726 | | | | | | | 0, |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | | | 26,3 | | | | | | |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | | | | +0,182 | | | | | |
| | r Mg/r Na..... | | | | | 1,78 | | | | |
| | r Ca/r (Na + K) | | | | | | 24,4 | | | |
| | r K/r Na..... | | | | | | | 0,148 | | |
| | r Ca — r $HCO_3$.. | | | | | | | | 0 | |

*(Suite)*

es sont exprimées en milligrammes par litre.)

| D$_2$ | | | | | | D$_3$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r Na + r K | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | r Mg/r Na | r Ca/(r Na + r K) | r K/r Na | r Ca — r $HCO_3$ | r $SO_4$/r Cl | r Mg/r Ca | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | r Mg/r Na | r Ca/(r Na + r K) | r K/r Na | r Ca — r $HCO_3$ |
| | | | | | | 0,686 | | | | | | | |
| | | | | | | | 0,074 | | | | | | |
| ,2 | | | | | | | | 14,7 | | | | | |
| | +0,755 | | | | | | | | + 0,84 | | | | |
| | | 2,77 | | | | | | | | 1,36 | | | |
| | | | 20 | | | | | | | | 13,7 | | |
| | | | | 0,336 | | | | | | | | 0,324 | |
| | | | | | 13,75 | | | | | | | | + 4,50 |
| | | | | | | 1,06 | | | | | | | |
| | | | | | | | 0,125 | | | | | | |
| | | | | | | | | 12,9 | | | | | |
| | —0,182 | | | | | | | | — 0,53 | | | | |
| | | 1,92 | | | | | | | | 1,54 | | | |
| | | | 28 | | | | | | | | 11,4 | | |
| | | | | 0,099 | | | | | | | | 0,098 | |
| | | | | | — 0,10 | | | | | | | | — 0,30 |

## TABLEAU XII

Analyses des eaux de la nappe (Elles sont exprimées en milligrammes par litre.)

| | | Forage | | | | | | Puits Préhistoire | | | | | | Piézomètre 1 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ | Ca | Mg | Na | K | Fe | $NH_4$ |
| Février 1961 | Ca..... | 127,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Mg..... | | 15,1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Na..... | | | 62 | | | | | | » | | | | | | » | | | |
| | K..... | | | | 17,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Fe..... | | | | | 0,37 | | | | | | | | | | | | | |
| | $NH_4$.... | | | | | | n | | | | | | | | | | | | |
| Mars 1961 | Ca..... | 154 | | | | | | 122 | | | | | | | | | | | |
| | Mg..... | | 14 | | | | | | 4,5 | | | | | | | | | | |
| | Na..... | | | 54 | | | | | | 20 | | | | | | » | | | |
| | K..... | | | | 11 | | | | | | 9 | | | | | | | | |
| | Fe..... | | | | | n | | | | | | n | | | | | | | |
| | $NH_4$.... | | | | | | n | | | | | | n | | | | | | |
| Août 1961 | Ca..... | 153 | | | | | | 96 | | | | | | | | | | | |
| | Mg..... | | 14 | | | | | | 5 | | | | | | | | | | |
| | Na..... | | | 56 | | | | | | 16 | | | | | | » | | | |
| | K..... | | | | 12 | | | | | | 10 | | | | | | | | |
| | Fe..... | | | | | n | | | | | | n | | | | | | | |
| | $NH_4$.... | | | | | | n | | | | | | n | | | | | | |
| Novembre 1961 | Ca..... | | | | | | | | | | | | | 61 | | | | | |
| | Mg..... | | | | | | | | | | | | | | 5 | | | | |
| | Na..... | | | | » | | | | | » | | | | | | 63 | | | |
| | K..... | | | | | | | | | | | | | | | | 11,5 | | |
| | Fe..... | | | | | | | | | | | | | | | | | n | |
| | $NH_4$.... | | | | | | | | | | | | | | | | | | n |
| Mars 1962 | Ca..... | | | | | | | 126 | | | | | | | | | | | |
| | Mg..... | | | | | | | | 7 | | | | | | | | | | |
| | Na..... | | | | » | | | | | 18 | | | | | | » | | | |
| | K..... | | | | | | | | | | 11 | | | | | | | | |
| | Fe..... | | | | | | | | | | | 0,26 | | | | | | | |
| | $NH_4$.... | | | | | | | | | | | | n | | | | | | |

## Analyses des eaux de la nappe (En milliéquivalents par litre.)

| | | Forage | | | | | | | Puits Préhistoire | | | | | | | Piézomètre 1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al | Cl | $SO_4$ | $HCO_3$ | $NO_3$ | $PO_4H$ | $SiO_2$ | Al |
| Février 1961 | Cl.... | 85,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 82,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 118,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | $NO_3$... | | | | n | | | | | | | » | | | | | | | » | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Al.... | | | | | | | n | | | | | | | | | | | | | | |
| Mars 1961 | Cl..... | 94 | | | | | | | 35 | | | | | | | | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 82 | | | | | | | 60 | | | | | | | | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 140 | | | | | | | 329 | | | | | | | | | | | |
| | $NO_3$... | | | | 302,5 | | | | | | | 1,5 | | | | | | | » | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | 3,6 | | | | | | | 9,6 | | | | | | | | |
| | Al.... | | | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | |
| Août 1961 | Cl..... | 99 | | | | | | | 14 | | | | | | | | | | | | | |
| | $SO_4$... | | 96 | | | | | | | 14 | | | | | | | | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | 152 | | | | | | | 317 | | | | | | | | | | | |
| | $NO_3$... | | | | 252 | | | | | | | 5 | | | | | | | » | | | |
| | $PO_4H$.. | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | | |
| | Al.... | | | | | | | n | | | | | | | n | | | | | | | |
| Novembre 1961 | Cl..... | | | | | | | | | | | | | | | 80 | | | | | | |
| | $SO_4$... | | | | | | | | | | | | | | | | 86 | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | | | | | | | | | | | | | | | 85 | | | | |
| | $NO_3$... | | | | » | | | | | | | » | | | | | | | 1,4 | | | |
| | $PO_4H$. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | n | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2,4 | |
| | Al.... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | n |
| Mars 1962 | Cl..... | | | | | | | | 38 | | | | | | | | | | | | | |
| | $SO_4$... | | | | | | | | | 54 | | | | | | | | | | | | |
| | $HCO_3$.. | | | | | | | | | | 354 | | | | | | | | | | | |
| | $NO_3$... | | | | » | | | | | | | 1,4 | | | | | | | » | | | |
| | | | | | | | | | | | | | n | | | | | | | | | |
| | $SiO_2$... | | | | | | | | | | | | | 2,4 | | | | | | | | |
| | Al.... | | | | | | | | | | | | | | n | | | | | | | |

## TABLEAU XIV

### Rapports des éléments chimiques de la nappe.

| | | Février 1961 | Mars 1961 | Août 1961 | Oct.-Nov. 1961 | Mars 1962 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Forage | $r\,SO_4/r\,Cl$ | 0,70 | 0,645 | 0,715 | » | » |
| | $r\,Mg/r\,Ca$ | 0,198 | 0,148 | 0,156 | » | » |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | 2,42 | 3,36 | 3,22 | » | » |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | — 0,125 | + 0,113 | + 0,133 | » | » |
| | $r\,Mg/r\,Na$ | 0,466 | 0,485 | 0,48 | » | » |
| | $r\,Ca/r\,(Na+K)$ | 2,02 | 2,093 | 2,79 | » | » |
| | $r\,K/r\,Na$ | 0,162 | 0,120 | 0,126 | » | » |
| | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | + 4,41 | + 5,40 | 5,10 | » | » |
| Puits Préhistoire | $r\,SO_4/r\,Cl$ | » | 1,29 | 0,745 | » | 1,08 |
| | $r\,Mg/r\,Ca$ | » | 0,059 | + 0,0834 | » | 0,092 |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | » | 5,89 | 5,5 | » | 6,49 |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | » | + 0,103 | — 0,77 | » | + 0,25 |
| | $r\,Mg/r\,Na$ | » | 0,415 | 0,58 | » | 0,745 |
| | $r\,Ca/r\,(Na+K)$ | » | 5,55 | 5,10 | » | 5,84 |
| | $r\,K/r\,Na$ | » | 0,265 | 0,366 | » | 0,360 |
| | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | » | + 0,70 | — 0,40 | » | 0,50 |
| Piézomètre 1 | $r\,SO_4/r\,Cl$ | » | » | » | 0,794 | » |
| | $r\,Mg/r\,Ca$ | » | » | » | 0,141 | » |
| | $\frac{r\,Mg + r\,Ca}{r\,Na + r\,K}$ | » | » | » | 1,15 | » |
| | $\frac{r\,Cl - r\,Na}{r\,Cl}$ | » | » | » | — 0,212 | » |
| | $r\,Mg/r\,Na$ | » | » | » | 0,157 | » |
| | $r\,Ca/r\,(Na+K)$ | » | » | » | 1,006 | » |
| | $r\,K/r\,Na$ | » | » | » | + 1,65 | » |
| | $r\,Ca - r\,HCO_3$ | » | » | » | 0,108 | » |

## TABLEAU XV

### Bilan du chlore des cases lysimétriques.

| $D_1$ | | | | | | | $D_2$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dates | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Dates | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Cl pluie reçue | Cl mis en réserve (a) | Cl drainé | 2 cumulé | 3 cumulé | Diff. 4-5 | | Cl pluie reçue | Cl mis en réserve (a) | Cl drainé | 2 cumulé | 3 cumulé | Diff. 4-5 |
| 11-2-59 14-3-60 | 5464,07 | 3024,63 | 2439,42 | 3024,65 | 2439,42 | + 685,23 | 11-2-59 14-3-60 | 5164,07 | 2861,03 | 2603,04 | 2861,03 | 2603,04 | + 257,99 |
| 14-3-60 6-2-61 | 5094,30 | 2090,08 | 3004,22 | 5114,73 | 5443,64 | — 328,91 | 14-3-60 6-2-61 | 5094,30 | 1485,27 | 3609,03 | 4346,30 | 6212,07 | — 1866,37 |
| 6-2-61 9-9-61 | 1098,29 | 889,73 | 208,56 | 6004,46 | 5652,20 | + 352,26 | 6- 2-61 20-10-61 | 1423,09 | 869,60 | 553,43 | 5215,90 | 6765,50 | — 1549,6 |
| 9-9-61 12-4-62 | 3064,37 | — 374,34 | 3438,71 | 5630,12 | 9090,91 | — 3460,79 | 20-10-61 12- 4-62 | 2739,57 | — 1995,80 | 4735,37 | 3220,10 | 11500,87 | — 8280,71 |
| 6-2-61 12-4-62 | 4162,66 | 515,39 | 3647,27 | 5630,12 | 9090,91 | — 3460,79 | 6-2-61 12-4-62 | 4162,66 | — 1126,14 | 5288,80 | 3220,10 | 11500,87 | — 8280,71 |

| $D_3$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Dates | 1<br>Cl pluie reçue | 2<br>Cl mis en réserve (a) | 3<br>Cl drainé | 4<br>2 cumulé | 5<br>3 cumulé | 6<br>Diff. 4-5 |
| 14-3-60<br>18-9-60 | 719,66 | 719,66 | 0 | 719,66 | 0 | 719,66 |
| 18-9-60<br>6-1-61 | 3094,46 | — 624,19 | 3718,65 | + 95,47 | 3718,65 | — 3623,18 |
| 6-1-61<br>28-2-61 | 1339,19 | 834,73 | 504,46 | 930,24 | 4223,11 | — 3292,87 |
| 1- 3-61<br>10-11-61 | 1570,10 | 1570,10 | 0 | 2304,83 | + 4223,11 | — 1918,28 |
| 10-11-61<br>12- 4-62 | 2533,52 | — 1765,68 | 4299,2 | 539,15 | 8522,31 | — 7983,16 |
| 28-2-61<br>12-4-62 | 4103,62 | — 195,58 | 4299,2 | 2199,15 | 8522,31 | — 7983,16 |

(a) Mis en réserve dans le sol ou absorbé par les plantes.
Le signe + indique que le chlore absorbé par les plantes ou mis en réserve est supérieur au chlore drainé.
Le signe — indique que le chlore absorbé par les plantes ou mis en réserve est inférieur au chlore drainé.
Les chiffres soulignés ont été pris en considération dans le texte.

TABLEA

CALCULS DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION POTENTIEL

| | Janvier | Février | Mars | Avril | M |
|---|---|---|---|---|---|
| CAZAUX | | | | | |
| $\theta$ mensuelles 1891 - 1930 (1) | 5,9 | 6,9 | 9,0 | 11,4 | 1 |
| Indices mensuels (i) | 1,29 | 1,63 | 2,44 | 3,48 | |
| Indice thermique (I) | » | » | » | » | » |
| Evapo-transpiration non corrigée | 19,5 | 24,0 | 29 | 46 | 6 |
| Coefficient correction, lat. 44°30' | 0,805 | 0,815 | 1,02 | 1,13 | 1 |
| Evapo-transpiration corrigée | 15,7 | 19,6 | 29,6 | 52 | 8 |
| Précipitations | 82 | 70 | 72 | 55 | 4 |
| Variation de la réserve d'eau du sol | » | » | » | » | — 3 |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 100 | 100 | 100 | 100 | 6 |
| Evapo-transpiration réelle | 15,7 | 19,6 | 29,6 | 52 | 8 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |
| Excédent | » | » | » | » | » |
| ARCACHON | | | | | |
| $\theta$ mensuelles 1891 - 1930 (1) | 6,7 | 8,0 | 9,9 | 12,4 | 1 |
| Indices mensuels (i) | 1,56 | 2,04 | 2,81 | 3,96 | |
| Indice thermique (I) | » | » | » | » | » |
| Evapo-transpiration non corrigée | 20 | 26 | 39 | 49 | 6 |
| Coefficient correction, lat. 44°40' | 0,80 | 0,81 | 1,02 | 1,13 | 1 |
| Evapo-transpir. potent. corrigée | 16 | 21 | 34,7 | 55,4 | 8 |
| Précipitations - Déficit | 76 | 70 | 72 | 53 | 5 |
| Variation de la réserve d'eau du sol | » | » | » | — 2,4 | — 2 |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 100 | 100 | 100 | 97,6 | 6 |
| Evapo-transpiration réelle | 16 | 21 | 34,7 | 55,4 | 8 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |
| Excédent | 60 | 49 | 37,3 | » | » |

(1) $\theta$ = températures.

DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION RÉELLE.

| Juin | Juillet | Août | Septemb^re | Octobre | Novemb^re | Décembre | Années |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17,7 | 19,7 | 19,6 | 17,4 | 13,7 | 9,1 | 6,6 | 12,7 |
| 6,78 | 7,97 | 7,91 | 6,61 | 4,60 | 2,48 | 1,52 | 51,88 |
| » | » | » | » | » | » | » | 51,88 |
| 80 | 93 | 92 | 78 | 58 | 30 | 22,5 | » |
| 1,29 | 1,305 | 1,205 | 1,04 | 0,947 | 0,795 | 0,755 | » |
| 103,2 | 121,3 | 110,8 | 81,1 | 54,8 | 23,9 | 17,0 | 712,1 |
| 55 | 54 | 59 | 67 | 106 | 117 | 96 | 881 |
| — 48,2 | — 67,3 | — 51,8 | — 14,1 | 51,2 | 93,1 | 79 | » |
| 16,7 | 0 | 0 | 0 | 51,2 | 100 | 100 | » |
| 103,2 | 70,7 | 59 | 67 | 54,8 | 23,9 | 17,0 | 595,6 |
| » | 50,6 | 51,8 | 14,1 | » | » | » | 116,5 |
| » | » | » | » | » | » | » | 285,4 |
| 18,8 | 20,7 | 21,0 | 19,1 | 15,1 | 10,3 | 8,2 | 13,8 |
| 7,43 | 8,59 | 8,78 | 7,61 | 5,33 | 2,99 | 2,12 | » |
| » | » | » | » | » | » | » | 58,98 |
| 78 | 93 | 98 | 86 | 64 | 37,5 | 27 | » |
| 1,29 | 1,31 | 1,21 | 1,04 | 0,94 | 0,79 | 0,75 | » |
| 100,6 | 121,7 | 118,5 | 89,4 | 60,2 | 29,6 | 20,2 | 753,1 |
| 53 | 51 | 56 | 68 | 104 | 114 | 103 | 874 |
| — 47,6 | — 70,7 | — 62,5 | — 21,4 | 43,8 | 84,4 | 82,8 | » |
| 20,2 | 0 | 0 | 0 | 43,8 | 100 | 100 | » |
| 100,6 | 71,2 | 56 | 68 | 60,2 | 29,6 | 20,2 | 618,7 |
| » | 50,5 | 62,5 | 21,4 | » | » | » | 134,4 |
| » | » | » | » | » | 84,4 | 82,8 | 255,3 |

TABLE

CALCULS DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION POTENTIELL

| BORDEAUX (Altitude 47) | Janvier | Février | Mars | Avril | Ma |
|---|---|---|---|---|---|
| $\theta$ mensuelles 1891 - 1930 (1) | 5,4 | 6,9 | 9,2 | 11,7 | 15 |
| Indices mensuels (i) | 1,12 | 1,63 | 2,52 | 3,62 | 5 |
| Indice thermique (I) | » | » | » | » | » |
| Evapo-transpir. potent. non corrigée | 16 | 23 | 33,5 | 45 | 66 |
| Coefficient correction, lat. 45° | 0,80 | 0,81 | 1,02 | 1,13 | 1 |
| Evapo-transpir. potent. corrigée | 12,8 | 18,6 | 34,2 | 51,0 | 84 |
| Précipitations | 66 | 68 | 80 | 67 | 65 |
| Variation de la réserve d'eau du sol | » | » | » | » | — 19 |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 100 | 100 | 100 | 100 | 80 |
| Evapo-transpiration réelle | 12,8 | 18,6 | 34,2 | 51,0 | 84 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |
| Excédent | 53,2 | 49,4 | 45,8 | 16,0 | » |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 200 | 200 | 200 | 200 | 180 |
| Evapo-transpiration réelle | 12,8 | 18,6 | 34,2 | 51,0 | 84 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |

(1) $\theta$ = températures.

DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION RÉELLE.

| Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Années |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18,3 | 20,5 | 20,5 | 18,3 | 13,8 | 8,9 | 6,5 | 12,9 |
| 7,13 | 8,47 | 8,47 | 7,13 | 4,65 | 2,39 | 1,49 | 54,11 |
| » | » | » | » | » | » | » | » |
| 82 | 95 | 95 | 82 | 56 | 31,5 | 21 | » |
| 1,29 | 1,31 | 1,21 | 1,04 | 0,94 | 0,79 | 0,75 | » |
| 105,8 | 124,4 | 114,9 | 85,3 | 52,6 | 24,9 | 17,7 | 724,7 |
| 60 | 52 | 47 | 55 | 81 | 93 | 99 | 833 |
| 45,8 | — 72,4 | — 67,9 | — 30,3 | — 28,4 | 68,1 | 73,3 | » |
| 34,7 | 0 | 0 | 0 | 28,4 | 96,5 | 100 | » |
| 105,8 | 87,1 | 47 | 55 | 52,6 | 24,9 | 15,7 | 589,2 |
| » | 37,3 | 67,9 | 30,3 | » | » | » | 135,5 |
| » | » | » | » | » | » | 69,8 | » |
| 134,7 | 62,3 | 0 | 0 | 28,4 | 96,5 | 100 | » |
| 105,8 | 124,4 | 109 | 55 | 52,6 | 24,9 | 15,7 | » |
| » | » | 67,9 | 30,3 | » | » | » | » |

TABLE

CALCULS DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION POTENTIELL

| | Janvier | Février | Mars | Avril | Ma |
|---|---|---|---|---|---|
| **DAX** | | | | | |
| $\theta$ mensuelles 1891 - 1930 (1) | 6,3 | 7,9 | 9,9 | 12,3 | 1 |
| Indices mensuels (i) | 1,42 | 2,00 | 2,81 | 3,91 | |
| Indice thermique (I) | » | » | » | » | » |
| Evapo-transpiration potentielle brute | 20 | 26 | 36 | 48 | 6 |
| Coefficient correction, lat. 44° | 0,81 | 0,82 | 1,02 | 1,13 | |
| Evapo-transpir. potent. corrigée | 16,1 | 21,3 | 36,7 | 54,2 | 8 |
| Précipitations | 110 | 101 | 109 | 101 | 8 |
| Variation de la réserve d'eau du sol | » | » | » | » | » |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 100 | 100 | 100 | 100 | 10 |
| Evapo-transpiration réelle | 16,1 | 21,3 | 36,7 | 54,2 | 8 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |
| Excédent | » | » | » | » | » |
| **MONT-DE-MARSAN** | | | | | |
| $\theta$ mensuelles 1891 - 1930 (1) | 6,2 | 7,2 | 9,7 | 12,1 | 16 |
| Indices mensuels (i) | 1,39 | 1,74 | 2,73 | 3,81 | 5 |
| Indice thermique (I) | » | » | » | 47 | » |
| Evapo-transpir. potent. non corrigée | 19 | 23 | 34 | » | 68 |
| Coefficient correction, lat. 44° | 0,81 | 0,82 | 1,02 | 1,13 | 1 |
| Evapo-transpir. potent. corrigée | 15,4 | 12,5 | 34,7 | 53,1 | 86 |
| Précipitations | 79 | 72 | 87 | 84 | 75 |
| Variation de la réserve d'eau du sol | » | » | » | » | — 11 |
| Réserve d'eau utile à la végétation | 100 | 100 | 100 | 100 | 88 |
| Evapo-transpiration réelle | 15,4 | 12,5 | 34,7 | 53,1 | 86 |
| Déficit d'alimentation des plantes | » | » | » | » | » |
| Excédent | » | » | » | » | » |

(1) $\theta$ = températures.

II

DE L'ÉVAPO-TRANSPIRATION RÉELLE.

| Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Années |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18,5 | 20,3 | 20,5 | 18,3 | 13,9 | 9,5 | 7,4 | 13,4 |
| 7,25 | 8,34 | 8,47 | 7,13 | 4,70 | 2,64 | 1,81 | » |
| » | » | » | » | » | » | » | 55,97 |
| 84 | 94 | 96 | 82 | 56 | 33,5 | 24,5 | 664 |
| 1,29 | 1,30 | 1,20 | 1,04 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | » |
| 108,4 | 122,2 | 115,2 | 85,3 | 53,2 | 26,8 | 18,6 | 740,5 |
| 88 | 64 | 67 | 92 | 136 | 132 | 144 | 1233 |
| 10,4 | — 58,2 | — 48,2 | + 6,7 | + 83,2 | 105,2 | » | » |
| 89,6 | 32,4 | 0 | + 6,7 | + 89,9 | 100 | 100 | » |
| 108,4 | 122,2 | 98,4 | 85,3 | 53,2 | 26,8 | 18,6 | 723,7 |
| » | » | 16,8 | » | » | » | » | » |
| » | » | » | » | » | » | » | 509,3 |
| | | | | | | | |
| 18,8 | 21,5 | 21,3 | 18,6 | 14,2 | 9,3 | 6,8 | 13,4 |
| 7,43 | 9,10 | 8,97 | 7,31 | 4,86 | 2,56 | 1,59 | 57,31 |
| » | » | » | » | » | » | » | » |
| 80 | 106 | 104 | 78 | 59 | 33 | 21 | » |
| 1,29 | 1,30 | 1,20 | 1,04 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | » |
| 103,1 | 137,8 | 124,8 | 81,1 | 56 | 26,4 | 16,0 | 747,3 |
| 72 | 61 | 58 | 68 | 85 | 91 | 98 | 930 |
| 31,1 | — 76,8 | — 66,8 | — 13,1 | 29 | 64,6 | 82 | » |
| 57,5 | 0 | 0 | 0 | 29 | 93,6 | 100 | » |
| 03,1 | 118,5 | 58 | 68 | 56 | 26,4 | 16,0 | 648,2 |
| » | 19,3 | 66,8 | 13,1 | » | » | » | 99,2 |
| » | » | » | » | » | » | » | 281,8 |

# BIBLIOGRAPHIE

## I. — ABRÉVIATIONS

| | |
|---|---|
| A. A. P. G. | Tulsa, American Association of Petroleum geologists Bulletin. |
| A. I. H. S. | Association Internationale d'Hydrogéologie Scientifique de l'Union géodésique et géophysique internationale. |
| B. S. G. F. | Paris, Bulletin de la Société Géologique de France. |
| C. R. Ac. Sc. | Paris, Comptes rendus de l'Académie des Sciences. |
| T. A. G. U. | Washington, Transactions American Geophysical Union. |
| W. S. P. | Washington, U. S. Department of the Interior, Geological Survey, Water supply paper. |
| Akad. | Akademia, Akademii. |
| Ann. | Annales. |
| Dokl. | Doklady. |
| Fac. | Faculté. |
| Inst. | Institut, Institute. |
| Journ. | Journal. |
| Nat. | Naturelles, Natural. |
| Phys. | Physique, Physics, Physical. |
| Proc. | Proceedings. |
| Sc. | Sciences. |
| Serv. | Service. |
| Soc. | Société, Society. |

## II. — TRANSLITTÉRATION

Les noms des auteurs russes, ainsi que les références de publications ont été translittérés. Les seules différences de prononciations sont les suivantes :

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Caractères..... | ž | j | u | c | č | š | šč | y | ju | ja |
| Prononciation française. | j | ï | ou | ts | tch | ch | chtch | i | iou | ia |

ANDERSON (V. G). — 1941. — The origin of the dissolved inorganic solids in natural waters with special reference to the O'Shannassy River Catchment, Victoria. *Australian chemical Inst. Journ. and Proc.*, vol. 8, n° 6, pp. 130-156.

— 1945. — Some effects of atmospheric evaporation and transpiration on the composition of natural waters in Australia. *Ibid.*, vol. 12, pp. 41-68, 83-98.

ARAGO (F.). — 1852. — Rapport sur un travail de M. BARRAL intitulé : Premier mémoire sur les eaux de pluie recueillies à l'Observatoire de Paris. *C. R. Ac. Sc.*, **34**, pp. 824-834.

ARLERY (R.), GARNIER (M.) & LANGLOIS (R.). — 1954. — Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. Extr. *La Météorologie*, octobre-novembre 1954, pp. 345-367.

ARRHENIUS (O.). — 1954. — Chemical denudation in Sweden-*Tellus*, vol. 6, n° 4, pp. 326-341.

BASTISSE (E. M.). — 1945. — Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. agronomiques*, XV^e^ année, n° 1, 1945, pp. 30-56.

— 1951 - 1953. — Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. *Ibid.*, 1951, pp. 727-781; 1953, pp. 33-76, 331-378, 519-560, 717-780.

BASTISSE (E. M.) & HENIN (S.). — 1955. — Id. (3^e^ mém.) : Résultats généraux obtenus pour les dix-huit années d'observations en cases lysimétriques. *Ibid.*, vol. 6, pp. 203-232.

BEHNE (W.). — 1953. — Untersuchungen zur Geochimie des Chlor und Brom. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 3, n° 4, pp. 186-215.

BERTRAND (G.). — 1943. — Sur le magnésium de l'eau de pluie récoltée à Grignon. *C. R. Ac. Sc.*, **215**, p. 364 et *C. R. Ac. Agric. Fr.*, **29**, pp. 180-182.

— 1943. — Sur le magnésium et le calcium de l'eau de pluie récoltée à Paris. *C. R. Ac. Sc.*, **216**, pp. 701-704.

— 1944. — Sur le magnésium contenu dans l'eau de pluie à Paris. *Ann. Inst. Pasteur*, **70**, pp. 234-247.

— 1945. — Le potassium dans l'eau de pluie. *C. R. Ac. Sc.*, **220**, pp. 865-868.

— 1945. — Sur l'origine multiple du magnésium contenu dans l'eau de pluie. *Ann. Agrom.*, 15^e^ année, n° 2, pp. 153-160.

— 1945. — Sur le potassium de l'eau de pluie. *Ibid.*, n° 3, pp. 343-350.

— 1946. — Id. *Ann. Inst. Pasteur*, **72**, pp. 621-630.

— 1947. — Démonstration de la présence du magnésium et du potassium dans l'eau de pluie. *C. R. Ac. Sc.*, **225**, p. 169.

BŒUF (F.) & NOVIKOFF (V.). — 1936. — Cultures en cases lysimétriques au Service botanique et agronomique de Tunisie.

*Ann. du Serv. Botanique et Agronomique de Tunisie,* **12-13,** pp. 679-696.

BORDAS (F.) & DESFEMMES (A.). — 1927. — La répartition et le transport des chlorures dans l'atmosphère. *C. R. Ac. Sc.,* **185,** p. 603.

BURKSER (E. S.) & FEDOROVA (N. E.). — 1955. — Rôle de la composition chimique des précipitations atmosphériques dans la formation des eaux naturelles. *Gidrokhimičeskie materialy,* **24,** pp. 81-83.

BUCHAN (St.). — 1958. — Variations in mineral contents of some ground waters. *Proc. of the Soc. for water treatment and examination,* Londres, vol. 7, pp. 11-29.

BURDON (D. J.). — 1958. — Chemical aspects of the formation of ground water in the zones of infiltration and aeration. UNESCO course on hydrogeology. Desert Inst. Cairo.

BURDON (D. J.) & MAZLOUM (S.). — 1961. — Some chemical types of ground water from Syria. Les problèmes de la salinité dans les régions arides. *Actes du Colloque de Téhéran. Aride zone research,* vol. XIV, UNESCO, pp. 73-90.

CHILINGAR (G. V.). — 1956. — Durov's classification of natural waters and chemical composition of atmospheric precipitation in U. R. S. S. : a review. *T. A. G. U.,* vol. 37, pp. 193-196.

— 1956. — Cl and $SO_4$ content of atmospheric precipitation in U. R. S. S. *Ibid.,* n° 4, pp. 410-412.

COLLINS (W. D.) & WILLIAMS (K. T.). — 1933. — Chloride and sulphate in rain water. *Ind. Eng. chem.,* **25,** pp. 944-945.

CONWAY (E. J.). — 1942. — Mean geochemical data in relation to oceanic evolution. *Proc. royal irish Acad.,* **48,** pp. 119-159.

COUTAGNE (A.). — 1942. — L'évaporation du sol et le déficit d'écoulement considérés du point de vue hydrographique, agronomique et climatologique. *La Météorologie,* 1er juillet 1942, pp. 150-176.

DAGASSAN (Eric). — 1962. — Etude hydrogéologique : la nappe phréatique du bassin de l'Eyre (rive gauche de Salles à Pissos). Thèse de 3e cycle de l'Enseignement supérieur, n° d'ordre 164, Fac. Sc. Bordeaux, 1 vol., 59 p., très nombreux tableaux + 8 cartes hors-texte.

DEMOLON (A.). — 1952. — La dynamique du sol, 1 vol., 520 p., 132 fig., 5e éd., Paris, Dunod.

DENIS (Alain). — 1962. — Etude hydrogéologique. La nappe phréatique du Bassin de l'Eyre (la basse vallée). Thèse de 3e cycle de l'Enseignement sup., n° d'ordre 165, Fac. Sc. Bordeaux, 1 vol., 45 p. + 26 p. de tableaux, + 8 cartes hors-texte.

DUROV (S. A.) & FEDOROVA (N. E.). — 1955. — Sources of ionic salt composition of atmospheric precipitation in U. S. S. R. *Doklady. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, vol. 103, n° 4, pp. 663-665.

ERIKSSON (E.). — 1952. — Composition of atmospheric precipitation. — I. Nitrogen compounds. *Tellus*, vol. 4, pp. 215-232.

— 1952. — II. II. Sulphur, chloride, iodine compounds. Bibliography. *Ibid.*, vol. 4, pp. 280-303.

— 1955. — Airborne salts and the chemical composition of rivers waters. *Ibid.*, vol. 7, pp. 243-250.

— 1958. — The chemical climate and Saline soils in the arid zone. UNESCO, Paris, Climatology *Review of Research, Aride zone research*, pp. 147-180.

— 1959. — On the geochemistry of chloride and sulfate. Geophysical monograph n° 3. Atmospheric chemistry of chlorine and sulfur compounds. *American geophysical Union*, publ. n° 652.

GATTEWOOD (J. S.), ROBINSON (T. N.), COLBY (B. R.), HEM (J. D.) & HALPENNY (L. C.). — 1950. — Use of water by bottom land vegetation in lower Safford Valley, Arizona. *W. S. P.*, 1103, 1 vol., 210 p., 45 fig., 5 pl. hors-texte.

GENEVOIS (L.) & FLAVIER (H.). — 1961. — Recherches des substances radioactives d'origine atmosphérique dans les végétaux et les poissons de la région landaise. Extr. *Procès-Verbaux des Séances de la Soc. Sc. Phys. et Nat. de Bordeaux*, séance du 15 mars 1961, 10 p.

GORHAM (E.). — 1955. — On the acidity and salinity of rain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 7, pp. 231-239.

GORŠKOV (G. P.) & JAKUŠOVA (A. F.). — 1957. — Géologie générale, 1 vol., 462 p., 246 fig. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscou.

GRANDEAU (L.). — 1897. — Traité d'analyses des matières agricoles, **1**, 1 vol., 560 p., Berger-Levrault, Paris.

HALLAIRE (M.). — 1957. — Le rôle de la végétation dans l'épuisement des réserves en eau du sol. *A. I. H. S.*, public. n° 44, pp. 412-422.

HANYA TAKAHISA. — 1951. — Average composition of Japanese fresh waters and some considerations on it. Assemblée, Bruxelles, *A. I. H. S.*, public. n° 34, pp. 516-519.

HUTTON (J. T.). — 1958. — The chemistry of rain water with particular reference to conditions in south eastern Australia. Recherches sur la zone aride. Climatologie et Microclimatologie. *Actes du Colloque de Camberra*, UNESCO, pp. 285-292.

JACKSON (D. D.). — 1905. — The normal distribution of chlorine in natural waters of New York and New England. *W. S. P.* n° 144.

JACOBS (W.). — 1937. — Preliminary report on a study of atmospheric chlorides. *Monthly Weather Review*, vol. 65, p. 147.

JUNGE Chr. (E.) & GUSTAVSON (P. E.). — 1957. — On the distribution of sea salt over the United States and its removal by rain. *Tellus*, vol. 9, pp. 164-173.

JUNGE Chr. (E.) & WERBY (R. T.). — 1958. — The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulfate in rain water over the United States. *Journ. of Meteorology*, vol. 15, pp. 417-425.

KHASANOV (A. S.). — 1961. — Signification des eaux atmosphériques dans le processus de la formation de la composition saline des eaux souterraines. *Dokl. Ak. Nauk. Uz. S. S. R.*, n° 3, pp. 19-21.

LAWES (J. B.), GILBERT (J. M.) & WARRINGTON (R.). — 1881-1882. — On the amount and composition of rain and drainage waters collected at Rothamsted. *Journ. of the royal agriculture Soc. of England*, 1881, vol. 17, pp. 241-279 et 311-350; 1882, vol. 18, pp. 1-71.

— 1883. — New determinations of ammonia, chlorine and sulphuric acid in the rain water collected at Rothamsted. *Journ. Royal agriculture Soc.*, p. 313.

LEEFLANG (K. W. H.). — 1938. — Die chemische Samenstellung den Neerslag in Nederland. *Chem. Weekbl.*, vol. 35, pp. 658-664.

LEFORT (J.). — 1859. — Traité de chimie hydrologique, 1 vol., 622 p., Masson, édit., Paris.

LOEWENGART (S.). — 1958. — Geochemistry of waters in northern and central Israël and the origin of their salts. *Bull. of the Research Council of Israël*, section G. Geo-Sciences, vol. 7 G, décembre 1958, n° 4, pp. 176-205.

— 1961. — Airborne salts. The major source of the salinity of waters in Israël. *Ibid.*, vol. 10 G, n° 1-2, pp. 183-206.

LUKAŠEV (K. I.). — 1958. — Eléments de lithologie et de géochimie de la couche d'altération. Izdatel'stvo Akademii nauk belorusskoj S. S. S. R., 1 vol., 468 p., Minsk.

MAKSIMOVICH (G. A.). — 1953. — About role of atmospheric precipitation in transportation of solutes. *Doklady. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, vol. 92, n° 2, pp. 401-403.

MATTHISS (G.). — 1958. — Geologische und hydrochemische Untersuchungen in der östlichen Vorderpfalz zwischen Worms und Speyer. *Notizb. hess. L. Amt. Bodenforschungen*, **86**, pp. 335-378.

PANTANELLI (E.). — 1937. — Irrigazione con aque salmastre. Stazione agraria sperimentale Bari, Mém. 26, public. 186, 80 p., Bari.

PASSERINI (N.). — 1893. — Sopra la quantità di cloro contenuta nelle pioggie cadute presso l'osservatorio della scuola Agraria di Scandicci negli anni 1890-1891. *Bull. Mens. Osservatorio centrale de Moncalieri*, fasc. 66.

PASSERINI (N.) et GALLI (P.). — 1927. — Sperimenti intorno l'azione del chloruro sodico contenuto nell'aqua di irrigazione su di alcune priante coltivate extr. *Bolletino del R. Instituto superiore agrario di Pisa,* 86 p.

PEREL'MAN (A. I.). — 1961. — Géochimie du « milieu ». Gosudorstvennoe Izdatel'stvo geografičeskoj literatury, 1 vol., 496 p., nbr. fig., Moscou, 1961.

PETROVIC (G.). — 1956. — Types chimiques des eaux superficielles et souterraines et des sols environnants de la région panonnienne. VIe Congrès de la Science du sol. Rapports, vol. B, Commission I, pp. 111-115.

PLAISANCE (G.) & CAILLEUX (A.). — 1958. — Dictionnaire des sols. 1 vol., 604 p. La Maison Rustique, Paris.

POPP (M.). — 1931. — Direkte Düngung, in Blank Handbuch der Bodenlehre, **9**, pp. 208-267, Berlin, J. Springer.

RANKAMA (K.) & SAHAMA (Th. G.). — 1950. — Geochemistry, 1 vol., 912 p., The University of Chicago Press, Chicago.

RESSOUCHES (Pierre). — 1962. — Etude hydrogéologique : la nappe phréatique du bassin de l'Eyre (rive gauche, de Pissos à Lestage). Thèse de 3e cycle de l'Enseignement supérieur, n° d'ordre 166, Fac. Sc. Bordeaux, 1 vol., 91 p. + 43 tabl., + 11 pl., + 8 cartes hors-texte.

RIEHM (H.) & QUELLMALZ (E.). — 1958. — Die Bestimmung der Pflanzennährstoffe in Regenwasser und in der Luft and ihre Bedeutung für die Landwirtschaft. Extr. vol. Centenaire de la Station agronomique d'Augustenberg, près Karlsruhe (Grötzingen bei Karlsruhe), pp. 171-183.

RIFFENBURG (H. B.). — 1925. — Chemical character of ground waters of the Northern Great Plains. *W. S. P.* n° 560, pp. 31-52.

RUSSEL (E. J.) & APPLEYARD (A.). — 1915. — The atmosphere of the soil : its composition and the causes of variation. *The Journ. of agriculture Science,* vol. 7, pp. 1-48.

RUSSEL (E. J.) & RICHARDS (E. M.). — 1919. — Eau de pluie à Rothamsted jusqu'en 1916. *The Journ. of agriculture Science,* vol. 9, p. 324.

SANSON (J.). — 1945. — Données statistiques relatives à la climatologie de la France. *Météorologie nationale,* 148 p., Paris.

SCHLŒSING (Th.). — 1870. — Analyses des eaux contenues dans les terres arables. *C. R. Ac. Sc.,* vol. 70, pp. 98-101.

— 1893. — Chimie agricole. Encyclopédie - Aide-Mémoire Léauté, 1 vol. 208 p., Paris, Gauthier-Villars & Masson.

SCHŒLLER (H.). — 1934. — Les échanges de bases dans les eaux souterraines vadoses : trois exemples en Tunisie. *B. S. G. F.* (5), **4**, pp. 389-420.

— 1941. — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses. *Ibid.* (5), **11**, pp. 267-289.

SCHŒLLER (H.). — 1946. — Les variations de la composition chimique de l'eau dans une même nappe souterraine. *P.-V. Soc. Sc. phys. et nat. de Bordeaux*, pp. 19-29.

— 1948. — Les variations de la composition chimique dans les nappes souterraines. *Procès-Verbal Assemblée Oslo. Union géod. et géophys. intern. A. I. H. S.*, pp. 130-134.

— 1949. — Hydrogéologie, 1 vol., 365 p., nombreuses figures. Ecole Nationale du Pétrole et des Combustibles liquides. Paris et Rueil.

— 1955. — Géochimie des eaux souterraines. Application aux eaux de gisement de pétrole, 1 vol., 213 p., 48 fig. Edit. Technip, Paris.

— 1960. — Salinité des eaux souterraines, évapo-transpiration et alimentation des nappes. *A. I. H. S.*, public. n° 52, pp. 488-494.

— 1962. — Les eaux souterraines, 1 vol., 642 p., 187 fig. Paris, Masson.

SCHŒLLER (M.). — 1958 *a*. — Géochimie des eaux d'infiltration. Diplôme d'études supérieures, Fac. Sc. Bordeaux.

— 1958 *b*. — Variation de la composition chimique des solutions des sols avec la nature pédologique et comparaison de la composition chimique de ces sols avec celle des nappes phréatiques sous-jacentes. *C. R. Ac. Sc.*, **246**, pp. 2507-2508.

— 1958 *c*. — Variation de la composition chimique des solutions des sols suivant les horizons pédologiques. *Ibid.*, pp. 2276-2278.

— 1960. — Teneurs mensuelles et annuelles en chlore de l'eau de pluie dans le Bassin d'Aquitaine. *A. I. H. S., Assemblée Helsinki*, public. n° 53, pp. 343-350.

— 1961. — Calculs de l'évapo-transpiration par la méthode de Thornthwaite et par celle des chlorures. Concordance des résultats. *C. R. Ac. Sc.*, **253**, pp. 3014-3015.

— 1961. — Calcul du bilan des nappes d'eau des « Sables des Landes » en utilisant la teneur en chlore de l'eau des nappes et celle de l'eau de pluie. *C. R. Ac. Sc.*, **253**, pp. 1598-1599.

SKYNNUKOVA (I. N.). — 1959. — Les solutions des sols de la partie méridionale forestière et leur rôle dans les processus actuels de la formation des sols. *Akademija Nauk S. S. S. R.*, Počvennyj institut sovremennye nočvennge projessy evropeiskoj časti S. S. S. R., Moscou, pp. 50-165.

SOULMAGNON (H.). — 1929. — Recherches sur les chlorures apportées au sol par l'atmosphère. *Ann. Serv. bot. et agr. de Tunisie*, vol. 7, pp. 163-174.

VERNADSKIJ (V. I.). — 1933-1934. — Histoire des minéraux de l'écorce terrestre. T. II : Histoire des eaux naturelles, 1re partie, 1er tome 1933, 2e tome 1934, 2 vol., 402 p., Leningrad.

VOUVÉ (Jean). — 1962. — Etude hydrogéologique : la nappe phréatique du bassin de l'Eyre (rive droite de la petite Eyre,

d'Argelouse à Cazalis). Thèse du 3e cycle d'enseignement sup., n° d'ordre 167, Fac. Sc. de Bordeaux, 1 vol., 135 p. + tableaux, + 8 cartes hors-texte.

WARRINGTON (R.). — 1887. — A contribution to the study of well waters. *Journ. of the chemical Soc. of London,* vol. 51, pp. 500-552.

YAALON (D. H.). — 1961. — On the origin and accumulation of salts in ground water and in soils of Israel. Department of geology. *The Hebrew University of Jerusalem,* public. n° 255, 42 p.

ZONN (S. V.). — 1945. — Chemical composition of ground waters as dependent on soil formation. *C. R. Ac. Sc. U.R.S.S.,* vol. 49, n° 4, pp. 284-287.

# TABLE DES MATIÈRES


Pages

INTRODUCTION ..... 1

CHAPITRE PREMIER. — FACTEURS INTERVENANT DANS LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU D'INFILTRATION ..... 5

I. — La composition chimique de l'eau de pluie .... 5

A. — Origine des sels contenus dans l'eau de pluie ..... 5

B. — Concentrations en sels, en fonction de la distance de la mer ..... 8

C. — Variation de la composition chimique dans le temps, en un même point. 10

D. — Composition des eaux de pluie ..... 11

II. — Les phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans les sols ..... 14

A. — Formation des sols ..... 14

B. — Les facteurs généraux de la formation des sols ..... 16

C. — Possibilités de migrations aqueuses ... 20

D. — Coefficient de migration par l'eau .... 20

E. — Coefficient d'absorption biologique ... 21

F. — Cycle pédologique ..... 21

G. — Rôle des saisons ..... 23

CHAPITRE II. — ETUDE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFÉRENTS HORIZONS DU SOL ..... 24

I. — Introduction ..... 24

II. — Les méthodes employées ..... 26

A. — Extraction des solutions ..... 26

B. — Les études chimiques ..... 28

III. — Les sols bruns lessivés ..... 31

A. — Description des sols ..... 31

B. — Analyse des eaux des sols ..... 33

Pages

C. — Eaux des sols en deux points différents : à Baron et à Pompignac, à la même date ..... 33
D. — Eaux des sols en un même point, mais en deux saisons différentes ..... 41
E. — Comparaison des eaux des sols avec celles des nappes souterraines sous-jacentes ..... 43

IV. — Les sols podzoliques ..... 46
A. — Description des sols podzoliques étudiés ..... 46
B. — Analyses des eaux des sols podzoliques. 49
C. — Eaux des sols en deux points différents à la même date : Martignas et Caupian ..... 50
D. — Etude des eaux d'imbibition d'un même sol, mais à deux dates différentes : Haillan (février 1954 et avril 1955) ..... 54
E. — Comparaison des eaux d'imbibition des podzols avec celles des nappes d'eau souterraine sous-jacentes ..... 59

V. — Eaux des sols podzoliques dans les cases lysimétriques du Centre d'Hydrogéologie - Géochimie de Talence ..... 60
A. — Etablissement des cases lysimétriques. 60
B. — Pluviométrie ..... 62
C. — Analyses chimiques ..... 62
D. — Mouvement des éléments chimiques des solutions dans les divers horizons pédologiques ..... 65
E. — Comparaison entre la période de lessivage et la période de libération dans les cases lysimétriques ..... 67
F. — Comparaison avec la nappe souterraine sous-jacente ..... 71

VI. — Etude du bilan des éléments chimiques, du chlore en particulier, dans les cases lysimétriques .... 74
A. — Introduction ..... 74
B. — Le chlore de l'eau de pluie. - Concentration. - Variations ..... 75
C. — Le chlore de l'eau dans les cases lysimétriques ..... 76

Pages

D. — Le bilan du chlore dans les cases lysimétriques ..... 82
E. — Cycle pédologique des sels ..... 85
F. — Calcul du coefficient d'alimentation ... 97

CHAPITRE III. — LE BILAN DU CHLORE ET DE L'EAU DANS LES NAPPES DES « SABLES DES LANDES » ..... 111

I. — Introduction ..... 111

A. — Historique ..... 111
B. — Calcul du bilan à l'aide du chlore.... 115

II. — La zone Sud en période de hautes eaux (fin hiver - printemps - mars - avril) ..... 124

A. — Statistiques générales des concentrations en chlore de la zone Sud .... 125
B. — Calcul du coefficient d'alimentation A. 129
C. — Calcul de l'infiltration et de l'évapotranspiration ..... 130

III. — La zone Nord en période de hautes eaux ..... 137

A. — Statistiques générales des concentrations en chlore ..... 137
B. — Calcul du coefficient d'alimentation A = Cl p/Cl n, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration ..... 141

IV. — La zone Sud en période d'étiage ..... 144

A. — Statistiques générales des concentrations en chlore ..... 144
B. — Calcul du coefficient d'alimentation, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration ..... 149

V. — La zone Nord en période d'étiage ..... 150

A. — Statistiques générales des concentrations en chlore ..... 150
B. — Calcul du coefficient d'alimentation, de l'infiltration et de l'évapo-transpiration ..... 153
C. — Le chlore de l'eau des rivières, le coefficient d'alimentation des nappes et l'évapo-transpiration ..... 153

CONCLUSIONS ..... 159

ANNEXES ..... 179

Pages

La migration aqueuse et l'absorption biologique des éléments dans le sol, d'après PEREL'MAN ..... 179

A. — Les possibilités de migration aqueuse. 179
B. — Coefficient de migration par l'eau .... 180
C. — Valeurs de l'intensité de migration aqueuse des éléments ..... 181
D. — Classes de migration aqueuse ..... 182
E. — Le coefficient d'absorption biologique. 182

Tableau I. — Analyse des eaux de dilution ..... 189
Tableau II. — Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume de l'humidité mesurée du sol ..... 190
Tableau III. — Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores ..... 191
Tableau IV. — Rapports des éléments ..... 192
Tableau V. — Analyse des eaux de dilution ..... 193
Tableau VI. — Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume de l'humidité mesurée du sol ..... 194
Tableau VII. — Composition de l'eau de dilution, concentrée de manière que son volume soit égal au volume des pores ..... 195
Tableau VIII. — Rapports des éléments ..... 196, 197
Tableaux IX, X, XI. — Analyses des eaux des cases lysimétriques .... 198, 199, 200, 201, 202, 203
Tableaux XII, XIII. — Analyses des eaux de la nappe. 204, 205
Tableau XIV. — Rapports des éléments chimiques des eaux de la nappe ..... 206
Tableau XV. — Bilan du chlore des cases lysimétriques. 208, 209
Tableaux XVI, XVII, XVIII. — Calculs de l'évapo-transpiration potentielle et de l'évapo-transpiration réelle ..... 210, 211, 212, 213, 214, 215

BIBLIOGRAPHIE ..... 217
TABLE DES MATIÈRES ..... 225
RÉSUMÉS ..... 229

# RÉSUMÉS

Le but de notre travail a été d'apporter une contribution à l'étude de l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines.

D'abord, nous avons étudié, au point de vue géochimique, les solutions des sols, extraites en laboratoire, de podzols et de sols bruns lessivés; nous avons cherché les rapports et les différences qui se manifestent dans un même sol, suivant les horizons, ou entre des sols de nature pédologique différente, ou entre les eaux des sols et les eaux de la nappe phréatique sous-jacente. L'extraction des solutions des sols en laboratoire, présentant certains inconvénients, nous avons construit des cases lysimétriques qui permettent de recueillir les eaux des horizons A, B, C, de podzols et, en même temps, de dresser un bilan : éléments apportés par la pluie, éléments dissous dans le sol, éléments drainés vers les nappes.

Les résultats obtenus nous ont montré que la concentration du chlore de l'eau de pluie et la concentration du chlore des eaux souterraines, permettent de calculer le coefficient d'alimentation des nappes; nous l'avons vérifié pour la nappe des Sables des Landes.

## RESEARCHES ON THE ACQUISITION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF UNDERGROUND WATERS.

The aim of the researches was to give a contribution to the study of how ground waters aquire their chemical composition.

First we have studied the chemical composition of waters extracted from podzols and brown soils in laboratory. We have established the chemical relations and differences between the water of different soils horizons, between the water of different pedological kinds of soil and the underground water.

But the extraction in laboratory of the water from soils has some inconvenients. Therefore we have constructed three lysimeters in an experimental field in Talence (Gironde). One collected the water percolating through the horizon A. An other drained the water from the horizon B, and the last from the horizon C. We were then able to give a balance of the chemical elements of the rain water, of those dissolved from the soil and the chemical elements in the water seeping from the lysimeters and percolating to the ground water.

The results of our researches showed that it was possible to calculate the amount of recharge of the underground water, knowing the concentration of chlorine in the rain water and the concentration of chlorine in the ground water. We have verify this in studying the underground water of the Landes country between Bordeaux and Dax.

## FORSCHUNGEN ÜBER DER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG DES GRUNDWASSERS

Der Zweck unserer Arbeit war einen Beitrag zu den Studien zur Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des Grunwassers zu leisten .

Zuerst haben wir im Laboratorium das in den Podzolen und Braunböden enthaltene Wasser untersucht. Wir haben die Ähnlichkeiten und Verschiedenheiten im selben Boden, je nach den verschiedenen Horizonten, und zwischen verschiedenen Böden und dem Grundwasser gesucht.

Da die Entnahme des im Boden enthaltenen Wassers im Laboratorium gewisse Nachteile mit sich brachte, haben wir auf einem Versuchsfeld in Talence drei Lysimeter angelegt. In diesem Versuchfeld ist der Boden ein Podzol. So konnten wir das Wasser der verschiedenen Horizonte A, B und C auffangen und eine Bilanz der chemischen Stoffe, die das Regenwasser aufweist, die im Böden gelöst sind und derer, die im Drainierungswasser enthalten sind, aufstellen.

Nach den erhaltenen Ergebnissen konnten wir feststellen, das wir-dank der Konzentration des Chlors im Regenwasser und im Grundwasser- den Nahrungs Koeffizienten des Grunwasers errechnen können.

Diesen haben wir für das Grundwassers in den « Sables des Landes » bestätigt.

## Исследования по приобретению химического состава подземными водами

Мы поставили своей целью способствовать изучению приобретения химического состава подземными водами.

Сначала мы изучили, с геохимической точки зрения, почвенные растворы, полученные в лаборатории из подзола и бурых выщелочных почв; мы постарались установить проявляющиеся в одной и той же почве соотношения и различия в зависимости от горизонтов, или между почвами различной педологической природы, или между почвенными водами и грунтовыми нижележащими. Так как извлечение в лаборатории почвенных растворов представляет некоторые неудобства, то мы построили лизиметры, которые позволяют собирать воды с горизонтов А,Б,В, подзола и в то же время подвести итог: какие элементы принесены дождевой водой, какие растворены в почве, какие унесены в подземные воды.

Полученные нами результаты показали, что содержание хлора в дождевой воде и содержание хлора в подземных водах позволяют вычислить коэфициент подземного питания; мы его проверили для подземных вод песков в Ландах.

---

Bordeaux. — Impr. E. Drouillard, 3, place de la Victoire.

# DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ :

## CONCENTRATION DES EAUX SOUTERRAINES PAR ÉVAPORATION ET PAR DISSOLUTION

Vu :

*Les Membres du Jury :*

MM. M. AUMÉRAS
J. FLANDRIN
P. GEVIN

Vu et approuvé :

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

J. BRACONNIER.

Vu et accordé le permis d'imprimer :

Lyon, le 25 février 1963.

*Le Recteur, Président du Conseil de l'Université,*

P. LOUIS.